

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Tine Orel

POMNILNE ENOTE DO SSD TRDIH DISKOV IN NAPREJ

DIPLOMSKO DELO NA VISOKOŠOLSKEM STROKOVNEM ŠTUDIJU

Mentor: viš. pred. dr. Aljaž Zrnec

Ljubljana, 2012

IZJAVA O AVTORSTVU

diplomskega dela

Spodaj podpisani Tine Orel

z vpisno številko 63030167,

sem avtor diplomskega dela z naslovom:

Pomnilne enote do SSD trdih diskov in naprej

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal samostojno pod mentorstvom
viš. pred. dr. Aljaža Zrneca;
- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.)
ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela;
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v zbirki »Dela FRI«.

V Ljubljani, 2. oktobra 2012

Podpis avtorja/-ice:



Št. naloge: 00219/2012

Datum: 03.04.2012

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **TINE OREL**

Naslov: **POMNILNE ENOTE DO SSD TRDIH DISKOV IN NAPREJ
STORAGE UNITS TO SSD DRIVES AND BEYOND**

Vrsta naloge: Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija prve stopnje

Tematika naloge:

Od prvih preluknjanih kartic do današnjih magnetnih in polprevodniških nosilcev je razvoj računalnikov prepleten z razvojem pomnilnih enot. V okviru diplomskega dela predstavite razvoj pomnilnih enot, delovanje trenutnih popularnih enot ter nove prihajajoče tehnologije na področju pomnilnih enot. S pomočjo skript in drugih testnih orodij, ter s pregledom trga predstavite prednosti in slabosti med današnjimi magnetnimi in polprevodniškimi pomnilnimi tehnologijami ter predstavite rezultate.

Mentor:

viš. pred. dr. Aljaž Zrnec

Dekan:

prof. dr. Nikolaj Zimic



ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju, viš. pred. dr. Aljažu Zrnecu, za pomoč in potrpežljivost pri izdelavi diplomske naloge.

Posebna zahvala gre tudi staršem in kolegom, ki so me podpirali skozi vsa ta leta študija.

KAZALO

POVZETEK.....	1
ABSTRACT.....	2
1 UVOD	3
2 RAZVOJ POMNILNIH ENOT SKOZI ČAS IN POGLED V PRIHODNOST.....	4
2.1 KRONOLOŠKI PREGLED POMNILNIH ENOT	4
2.1.1 LUKNJANA KARTICA	4
2.1.2 LUKNJAN TRAK.....	5
2.1.3 MAGNETNI TRAK	6
2.1.4 MAGNETNI BOBEN	7
2.1.5 DISKETE	8
2.1.6 OPTIČNE POMNILNE ENOTE	9
2.2 POMNILNE ENOTE PRIHODNOSTI	10
2.2.1 SE TRDI DISKI BLIŽAJO SMETIŠČU ZGODOVINE?	10
2.2.2 MEMRISTOR	11
2.2.3 HOLOGRAFSKA PRIHODNOST	11
2.2.4 NADALJNI RAZVOJ SSD POGONOV	12
2.2.5 ZNANSTVENA FANTASTIKA?	12
3 SESTAVA IN DELOVANJE GLAVNIH POMNILNIH ENOT – TRDI DISKI IN SSD POGONI.....	14
3.1 TRDI DISK.....	14
3.1.1 KRATKA ZGODOVINA TRDEGA DISKA	14
3.1.2 ZGRADBA IN DELOVANJE	14
3.1.3 OKVARE	21
3.1.4 IZPELJANKE TRDIH DISKOV	22
3.2 POLPREVODNIŠKE POMNILNE ENOTE	22
3.2.1 BLISKOVITI POMNILNIK	22
3.2.2 SPOMINSKE KARTICE	24
3.2.3 USB KLJUČKI.....	24
3.2.4 SSD POGONI.....	25
3.2.2 PRIMERJAVA S SPOMINSKIMI KARTICAMI.....	28

4	PRIMERJAVA SSD POGONOV IN TRDIH DISKOV	29
4.1	ZAGON	29
4.2	NAKLJUČNI DOSTOP	29
4.3	ZAKASNITEV PRI BRANJU	29
4.4	HITROST PRENOSA	29
4.5	STALNA HITROST BRANJA	29
4.6	RAZDROBLJENOST	30
4.7	GLASNOST	30
4.8	NADZOR TEMPERATURE	30
4.9	DELOVANJE NA VISOKIH VIŠINAH	30
4.10	OBČUTLJIVOST NA ZUNANJE VPLIVE	30
4.11	NAMESTITEV	30
4.12	OBČULJIVOST NA MAGNETNA POLJA	31
4.13	TEŽA	31
4.14	ZANESLJIVOST IN ŽIVLJENSKA DOBA	31
4.15	VARNOST IN ENKRIPCIJA	31
4.16	KAPACITETA IN CENA NA KAPACITETO	31
4.17	SIMETRIJA BRANJA-PISANJA	32
4.18	PROSTI BLOKI	32
4.19	PORABA ENERGIJE	32
5	PRIMERJAVA DELOVANJA SSD POGONA IN TRDEGA DISKA	33
5.1	METODA TESTIRANJA	33
5.1.1	NALAGANJE SISTEMA	34
5.1.2	KOPIRANJE DATOTEK	34
5.1.3	DELOVANJE APLIKACIJE	35
5.1.4	DELOVANJE RAČUNALNIŠKE IGRE	36
5.1.5	SINTETIČNI TEST	36
5.2	CENA	38
6	ZAKLJUČEK	39
7	LITERATURA	40

SEZNAM SLIK

Slika 1: Jamska slika, ki nam po več kot 30.000 let še vedno podaja informacije (Povzeto po [1])...	4
Slika 2: Primer 80-vrstične luknjane kartice informacije (Povzeto po [4])	4
Slika 3: Tkalski stroj iz leta 1725 (Povzeto po [1]).....	5
Slika 4: Primer 5 in 8 vrstičnega traka (Povzeto po [5]).....	5
Slika 5: Magnetni trak (Povzeto po [6]).....	6
Slika 6: Serpentinast način zapisa (Povzeto po [6]).....	7
Slika 7: Magnetni boben (Povzeto po [1])	8
Slika 8: Notranji sestavni deli 3,5 palčne diskete: 1. stikalo za zaščito pred pisanjem, 2. pesto, 3. zaklop, 4. plastično ohišje, 5. papirnati kolut, 6. magnetni disk, 7. sektor diska (Povzeto po [7]).....	8
Slika 9: Sestava zapisljive zgoščenke (Povzeto po [31])	9
Slika 10: Sestava sedemnajstih namensko grajenih memristorjev iz deoksidiranega titanovega dioksida zgrajenih v Laboratorijih HP (Povzeto po [9])	11
Slika 11: Osnovna ideja holografskega shranjevanja podatkov(Povzeto po [10]).....	12
Slika 12: Model molekule iz 80 atomov ogljika z ujeto železno spojino iz dušika in železa (Povzeto po [11]).....	13
Slika 13: prvi trdi disk RAMAC (Povzeto po [14])	14
Slika 14: Glavni sestavni deli vsakega trdega diska (Povzeto po [15])	15
Slika 15:Razdelitev plošče (Povzeto po [15]).....	16
Slika 16: Glava in drsnik, ki lebdi na površini diska. Povečana slika bralno-pisalne glave(Povzeto po [16]).....	17
Slika 17: Klančina za posamezno glavo in »pristajalna« steza na površini(Povzeto po [17]).....	17
Slika 18: vzdolžni (longitudinalni) zapis (Povzeto po [15])	18
Slika 19: Vertikalni zapis(Povzeto po [15]).....	18
Slika 20: Primer formata zapisa na sledi na trdem disku (Povzeto po [15]).....	20
Slika 21: Primer naprednega formata (Povzeto po [18]).....	20
Slika 22: Poškodbe na plošči nastale zaradi sesutja glave (Povzeto po [19]).....	21
Slika 23: Plavajoča vrata prikaz tranzistorja (Povzeto po [22]).....	24
Slika 24: Najbolj razširjena vrsta spominskih kartic – SD kartice (Povzeto po [23])	24

Slika 25: Glavni sestavni deli USB ključka- 1. USB priključek, 2. krmilnik, 3. mostički za testiranje, 4. bliskoviti pomnilnik, 5. kristalni oscilator, 6. LED, 7. stikalo za zaščito podatkov, 8. prostor za dodaten bliskoviti pomnilnik (Povzeto po [24]).....25

SEZNAM TABEL

Tabela 1: Ključne razlike med NOR in NAND pomnilnikom (Povzeto po [15]).....	23
Tabela 2: Tabela izmerjenih časov	36

SEZNAM GRAFOV

Graf 1: Dobljeni rezultati v MB/s za posamezno meritev	37
Graf 2: Cena GB skozi leta (Povzeto [29])	38

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

- **ASCII** (ang. American Standard Code for Information Interchange) je ameriški standardni nabor za izmenjavo informacij, je 7-bitni nabor znakov; obsega $2^7 = 128$ znakov.
- **ATA** (ang. Advanced technology Attachment) je oznaka za standardni paralelni vmesnik za komuniciranje računalnik z diskom. Poznan je tudi pod kratico IDE.
- **BIOS** (ang. Basic Input Output System) je programska oprema, ki se nahaja v ROM in se izvede takoj po vklopu osebnega računalnika (PC). Omogoča nastavitve osnovnih parametrov strojne opreme in njeno testiranje ter nalaganje operacijskega sistema ali zagonskega nalagalnika.
- **CD** (ang. Compact disk) je vrsta optičnega medija.
- **CRC** (ang. Cyclic Redundancy Check) je dodatni bit za detekcijo in korekcijo napak pri branju.
- **DVD** (ang. Digital Versatile Disc) je digitalni pomnilniški medij. Na videz je zelo podoben starejšemu sorodniku, CD-ju. Pomembna razlika med njima je v gostoti zapisa.
- **ECC** (ang. Error Correcting Codes) so biti za detekcijo in korekcijo napak.
- **EPROM** (ang. erasable programmable read only memory) je vrsta bralnega pomnilnika, ki je obstojna po odklopu vira energije. Omogočen je večkratni prepis podatkov z uporabo ultravijolične svetlobe.
- **EEPROM** (ang. Electrically Erasable Programmable read-Only Memory) je vrsta obstojnega bralnega pomnilnika, ki omogoča večkratni prepis podatkov.
- **FGMOS** (ang. Floating gate MOSFET) je tranzistor, podoben tipičnim MOSFET-u s plavajočimi vratici.
- **HAMR** (ang. Heat-assisted magnetic recording) je tehnologija v razvoju za zapis na magnetni medij s pomočjo toplote. Trenutno naj bi omogočila podvojitev gostote zapisa na magnetni plošči.
- **MFTB** (ang. Mean Time Between Failures) je povprečni čas med dvema napakama.
- **MLC** (ang. Multi Level Cell) je večstopenjska celica, ki zmore shraniti več kot en bit podatkov.
- **NRRO** (ang. Non-repetable Runout) so premiki, ki povzročajo nenatančnost ležaja pri vrtenju osi in plošč.

- **RAID** (ang. Redundant array of independent disk) je standard povezovanja dveh ali več trdih diskov in upravljanja z njimi, ki je nastal z namenom, da bi lahko več manjših in počasnejših posameznih fizičnih diskov povezali v večjo in hitrejšo in/ali bolj zanesljivo logično enoto.
- **RAM** (Random Access Memory) je bralno-pisalni pomnilnik, imenovan tudi delovni pomnilnik. Podatke lahko vanj zapisujemo in jih beremo iz njega.
- **ROM** (ang. Read Only Memory) je bralni pomnilnik, na katerega je možen le enkratni zapis podatkov.
- **SATA** (ang. Serial ATA) je oznaka za standardni serijski vmesnik za komuniciranje računalnika z diskom.
- **SCSI** (ang. Small Computer system Interface) je oznaka za paralelni serijski vmesnik za komuniciranje računalnika z diskom.
- **SLC** (ang. Single Level Cell) je enostopenjska celica, ki lahko shrani po en bit.
- **SSD** (ang. Solid State Disk) je pogon, sestavljen v celoti iz bliskovitega ali DRAM pomnilnika.
- **TRM** (ang. Track Miss-Registration) je oznaka za napačno postavitev bralno-pisalne glave na sredino sledi pri trdih diskih.
- **USB** (ang. Universal Serial Bus) je večnamensko vodilo, namenjeno priklopu različnih perifernih naprav na računalnik.

POVZETEK

Naraščanje količine podatkov je botrovalo nastanku različnih medijev za hranjenje le-teh. Od prazgodovinskega kamna, skozi luknjane trakove in kartice iz začetka informacijske dobe do današnjih optičnih, magnetnih in polprevodniških pomnilnih enot, potreba po vse boljših načinih za hranjene podatkov še vedno narašča.

Med najbolj razširjenimi enotami za hranjenje podatkov je trdi disk. Trdi ali magnetni disk je pomnilna enota, sestavljena iz večjega števila plošč z namagneteno površino. Površine so opremljene z bralno-pisalnimi glavami, ki namagnetijo površino plošče (pisanje) ali zaznajo namagnetenost površine plošče (branje). Podatki so na plošči zapisani v sledeh, razdeljeni na različne sektorje v obliki različno usmerjenih namagnetenih področij. Pomični deli, ki sestavljajo trdi disk, so občutljivi na zunanje vplive in se lahko s časom obrabijo in pokvarijo, kar trdim diskom znižuje zanesljivost. Kljub temu so trdi diski zaradi visokih kapacitet in relativno nizkih cen primarna izbira za vgradnjo v računalnik.

Danes najbolj popularno alternativo in konkurenco trdim diskom predstavljajo polprevodniški diski, tako imenovani SSD (Solid State Disk) pogoni. SSD pogoni so pomnilne enote brez pomičnih delov. Podatki na SSD pogonu so lahko shranjeni na hitrejše, neobstoje DRAM pomnilnike in na počasnejše, obstojne, bliskovite NAND pomnilnike, ki ohranjajo podatke tudi po odklopu vira energije. To jih naredi zelo hitre, vzdržljive na zunanje vplive in varčne v primerjavi s trdimi diski, toda tudi dražje in manj prostorne. Navadnim uporabnikom so predvsem namenjeni SSD pogoni z bliskovitim NAND pomnilnikom, ki ima sicer omejeno število prepisov.

Ključne besede: razvoj pomnilnih enot, magnetni diski, polprevodniški diski.

ABSTRACT

The increase of the quantity of data that needs to be stored gave rise to different storage media. From stone in pre-history, to punched tape and cards from the beginning of the information age, to today's optical, magnetic and semiconductor storage units, the need for better ways of storing data is still increasing.

One of the most widely used data storage units is the hard disk drive. It consists of several rigid platters coated with magnetic material and magnetic heads, which magnetize the surface of the platter (write) or detect the magnetisation of the surface (read). The data is stored on the platter in tracks divided into sectors and magnetized areas of different orientation. The movable parts of the HDD are vulnerable to external factors and with time they can wear out and fail, a fact which reduces the hard disks reliability. Despite this, HDD's are the primary choice for data storage in personal computers because of their high capacities and relatively low prices.

The most popular alternative and competition to hard disks today are semiconductor storage units, solid-state drives. SSD's do not have moveable parts. The data in a SSD can be stored in faster, non-persistent DRAM memory or the slower, persistent flash NAND memory, which retains data without power. This makes them very fast, not affected by external factors and energy efficient compared to HDD's but they are also more expensive and can store less data. SSD's with flash NAND memory are meant for mainstream users, but they do have a limited write cycle life.

Keywords: development of storage units, magnetic drives, semiconductor drives.

1 UVOD

Že od same prazgodovine človeštvo ustvarja, zbira in shranjuje podatke na različne medije, naj si bo to slika na steni jame, rola papirusa ali knjiga v knjižnici. V današnji informacijski dobi vsako minuto ustvarimo več kot 48 ur posnetkov, napišemo več kot 30.000 novih spletnih dnevnikov, pošljemo več kot 204 milijone emajlov ter ustvarimo še nešteto količino drugih podatkov. Zaradi skoraj neskončnega števila novih informacij je potreba po zanesljivih in vse bolj prostornih pomnilnih enotah skokovito narasla. V ta namen so bile skozi leta razvite različne elektronske oz. digitalne pomnilne enote, kot so trdi diski, USB ključki, zgoščenke, spominske kartice itd., ki nam omogočajo, da imamo podatke, zbrane v večji knjižnici, na dlani ene roke.

2 RAZVOJ POMNILNIH ENOT SKOZI ČAS IN POGLED V PRIHODNOST

Kamen (Slika 1), ki še danes velja kot eden najbolj trajnih pomnilnih enot, in papir sta bila skoraj do moderne dobe edina načina za shranjevanje podatkov. S prihodom mehanizacije in kasneje digitalizacije je potreba po novih načinih shranjevanja narasla in nam prinesla izum slednjih pomnilnih enot.



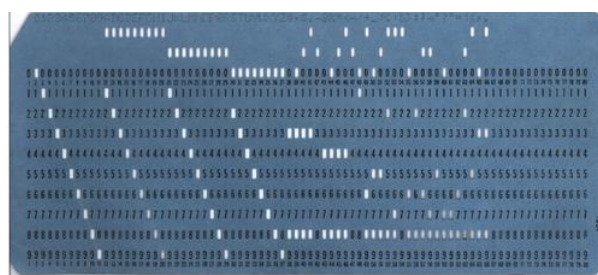
Slika 1: Jamska slika, ki nam po več kot 30.000 let še vedno podaja informacije (Povzeto po [1]).

2.1 KRONOLOŠKI PREGLED POMNILNIH ENOT

2.1.1 LUKNJANA KARTICA

Luknjane kartice (Slika 2) so bile uporabljene kot ena prvih oblik shranjevanja podatkov in programov. V praksi je preluknjana kartica kos tršega papirja z 80 vrsticami in z merami $187,325 \times 82,55$ mm. Razvite so bile pri IBM leta 1928 in so bile do razvoja magnetnih pomnilnih enot v 70. letih primarni način shranjevanja, vpisovanja in procesiranja podatkov.

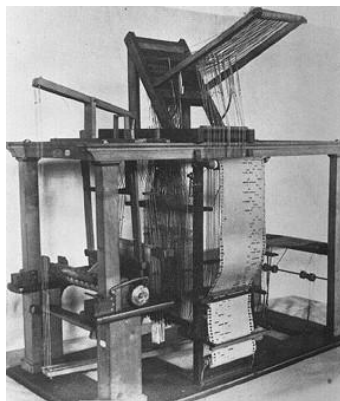
Podatki na karticah (številke in črke) so zapisane s kombinacijo lukenj. Bralna enota prebere položaj lukenj s pomočjo snopa svetlobe in fotocelice. Maksimalna kapaciteta teh kartic je bila 960 bitov.



Slika 2: Primer 80-vrstične luknjane kartice informacije (Povzeto po [4])

Zanimivo je, da so luknjane kartice, sicer v drugačni obliki kot tiste iz 20. stoletja, bile že v uporabi dobrih 200 let pred pojavom prvih elektronskih računalnikov. Takrat so bile uporabljene v tkalskih strojih (Slika 3) za reprodukcijo vzorcev. Omogočali so preprosto in

hitro menjavo programov oz. vzorcev z menjavo kartic. Kasneje v 19. stoletju so bile uporabljene v elektromehanskih računskih strojih.



Slika 3: Tkalski stroj iz leta 1725 (Povzeto po [1])

2.1.2 LUKNJAN TRAK

Luknjan trak (Slika 4) deluje na istem principu kot luknjane kartice. Snop svetlobe zasveti skozi luknjice. Svetlobo prebere fotocelica, ki odda signal, le-tega potem računalnik prevede. Vsaka vrstica na traku predstavlja en znak.



Slika 4: Primer 5- in 8-vrstičnega traka (Povzeto po [5])

Trakovi so sprva imeli le 5 lukenj na vrstico še iz časov tkalskih strojev. Kasneje je število lukenj naraščalo. V 60. letih je z razvojem ASCII kode število lukenj naraslo na 7 oziroma 8, kjer 8. luknja predstavlja parnostni bit za preverjanje napak. Luknjan trak so uporabljali predvsem za vpisovanje in izpis podatkov v teleprinterjih, miniračunalnikih, za prenos podatkov iz ROM-a in EPROM-a, v blagajnah kriptografiji ...

Kapaciteta traka je bila načeloma do 12 kilobajtov, saj je lahko pri večji količini podatkov prišlo do težav s papirjem. Hitrost prenosa podatkov je bila do 1.000 znakov na sekundo. Prednosti luknjanega traka so:

- dolgoživost – ob uporabi pravih materialov presega življenjsko dobo magnetnih trakov;

- dostopnost – trak je možno brati in dekodirati brez dodatnih pripomočkov. To omogoča tudi lažje odpravljanje napak in poškodb;
- enostavno popravljanje – trak je možno popraviti z lepilom. Podatke na traku se je popravljalo, tako da se je napačen del odrezalo ter ga prelepilo s popravljenim;
- enostavnost uničenja podatkov.

Omejitve luknjanega traka so:

- zanesljivost – trakove je bilo treba po kopiranju redno ročno pregledovali luknjo za luknjo;
- previjanje – previjanje traka je zelo oteženo zaradi visoke nevarnosti, da se med previjanjem pretrga, zato so določeni sistemi uporabljali desetkrat prepognjen trak;
- nizka gostota zapisa.

Dandanes je uporaba luknjanega traka zelo redka in počasi izginja. Kljub temu se še danes lahko kupi trak.

2.1.3 MAGNETNI TRAK

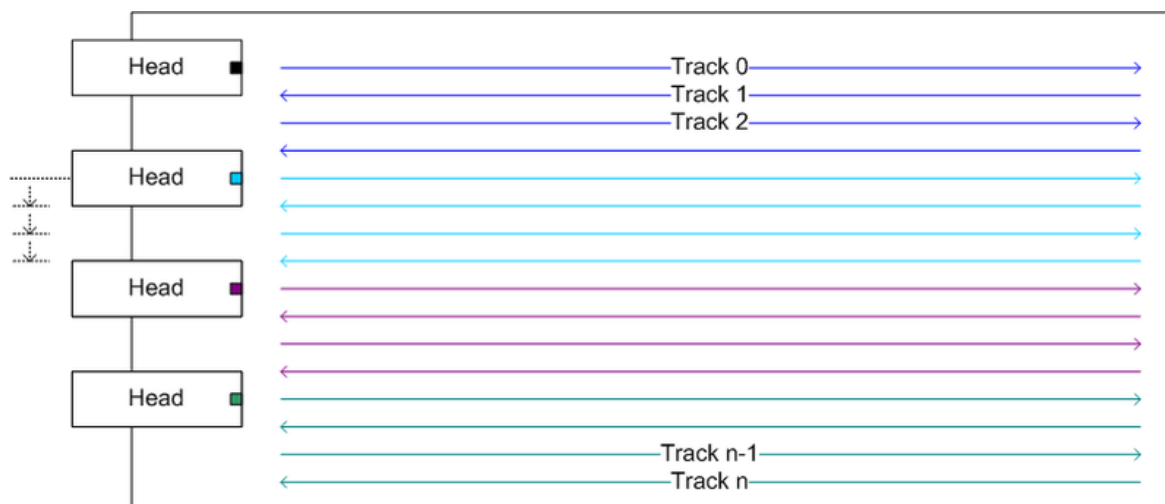
Magnetni trak (Slika 5) je bil odkrit že leta 1928. Osnovan je bil na magnetni žici iz konca 19. stoletja. Trak je bil prvotno uporabljen za magnetofone. Kot nosilec podatkov je bil prvič uporabljen šele v letu 1951 za primarno vhodno-izhodno napravo na računalniku UNIVAC 1. Trak je bil širok 12,7 mm, narejen iz mešanice niklja in brona. Gostota zapisa podatkov je bila 128 znakov na palec. Z 8. sledmi ob hitrosti vrtenja 2,54 m/s je bila teoretična hitrost branja 12.800 znakov na sekundo, toda zaradi praznih prostorov med sledmi je bil realni prenos podatkov okoli 7.200 znakov na sekundo. Od 8. sledi je 6 sledi namenjenih za podatke, 1 za pariteto in 1 za čas.



Slika 5: Magnetni trak (Povzeto po [6])

Prvi magnetni trakovi zaradi teže in velikosti niso bili primerni za prenos. Na prenosne magnetne trakove je bilo treba počakati do leta 1963, ko so se pojavile prve kasete. Kasete so bile sprva mišljene in uporabljene le kot nosilci zvoka in šele kasneje, od 70. let naprej kot nosilci podatkov. 90-minutne kasete so omogočala shranjevanje do 700 KB podatkov na stran in so bile predvsem popularne pri računalnikih ZX Spectrum in Commodor 64.

Poznamo več metod zapisa podatkov na magnetni trak. Prvi in najenostavnejši način zapisa je linearni način. V linearnem načinu zapisa več bralno pisalnih glav vzporedno piše sledi na trak od začetka do konca. Slabost linearnega načina je zelo nizka gostota zapisa. Variacijo tega načina predstavlja serpentinasti način zapisa (Slika 6), kjer je na traku več sledi kot glav. V tem načinu, ko trak pride do konca, se glava premakne na drugo sled in nato v obratni smeri piše. Postopek se ponavlja, dokler vse sledi niso zapolnjene. Rezultat tega načina je, da ob istem številu glav in dolžini traku dobimo veliko višjo kapaciteto.



Slika 6: Serpentinast način zapisa (Povzeto po [6])

Drugi način zapisa je tako imenovano skeniranje. Pri skeniranju so podatki zapisani po širini traku in ne po dolžini. Glave so postavljene na disk ali boben, ki se hitro vrti, medtem ko relativno počasni trak prehaja nad njim.

Do konca 20. stoletja je magnetni trak predstavljal glavni način shranjevanja podatkov, saj je bil prostorsko in cenovno bolj ugoden kot druge, takrat prisotne tehnologije. Z začetkom 21. stoletja so se stvari začele premikati v prid trdih diskov. Kljub temu magnetni trak ostaja priljubljen način shranjevanja podatkov na večjih strežnikih in osrednjih računalnikih, kjer posamezne preprosto izmenljive kartuše s trakom zdržijo kapacitete do 5 TB nestisnjenih podatkov. Osrednji računalniki so po navadi povezani na tako imenovane avtomatske knjižnice trakov, ki lahko vsebujejo tudi tisoče kartuš. Že najmanjši modeli teh knjižnic premorejo več kot petabajt¹ podatkov. Primer kartuše, uporabljene v teh sistemih je StorageTek T10000, ki ima z uporabo serpentinastega načina zapisovanja kapaciteto do 1 TB s 120 MB/s prenosa.

2.1.4 MAGNETNI BOBEN

Magnetni boben (Slika 7) je bil razvit v letu 1932 v Avstriji. Sestavljen je bil iz 20 cm visokega in 10 cm širokega kovinskega cilindra, ki so ga prevlekli s plastjo feromagnetne snovi. Bralno-pisalne glave so oddaljene nekaj mikrometrov od cilindra. Vsaka glava je

¹ 1.000 TB oziroma 10^{15} B

pokrivala eno vrstico na bobnu, ki je med vrtenjem cilindra zapisovala podatke, tako da je z električnim pulzom polarizirala feromagnetične delce na bobnu. Bralna glava je nato preverila, kateri delci so polarizirani (ti delci so predstavljali binarno 1) in kateri niso (ti delci so predstavljali binarno 0).

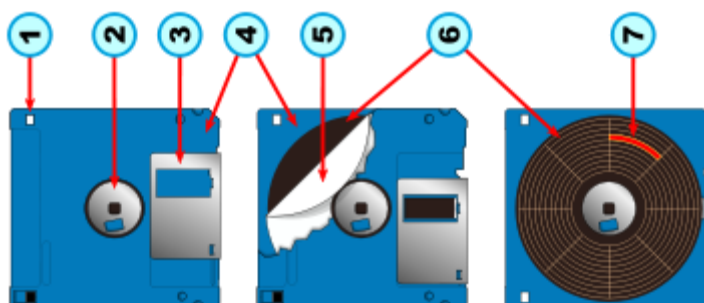


Slika 7: Magnetni boben (Povzeto po [1])

Kapaciteta magnetnih bobnov je znašala okoli 500.000 bitov. V 50. in 60. letih so bili uporabljeni kot glavni delovni pomnilnik v večini računalnikov. Podatki in programi so bili naloženi iz drugih pomnilnih enot, kot so bili na primer luknjan trak in luknjane kartice. Magnetne bobne so kasneje zamenjale komponente brez premičnih delov, kot je bil na primer spomin z magnetnim jedrom.

2.1.5 DISKETE

Diskete (Slika 8) so bile svoj čas, poleg magnetnih trakov, eden najbolj razširjenih ter preprostih načinov za prenos podatkov. Prve diskete so bile razvite pri IBM že v 60. letih, toda v komercialno uporabo so prišle šele v letu 1971. Sprva so omogočale le branje, njihova kapaciteta pa je znašala 80 KB in šele kasneje so napravam za branje disket dodali možnost zapisovanja podatkov. Tudi kapaciteta je bila povečana do 1,44 MB in velikost medija pomanjšanja iz 8 palcev na današnjih 3,5 palcev.



Slika 8: Notranji sestavni deli 3,5-palčne diskete: 1. stikalo za zaščito pred pisanjem, 2. pesto, 3. zaklop, 4. plastično ohišje, 5. papirnati kolut, 6. magnetni disk, 7. sektor diska (Povzeto po [7])

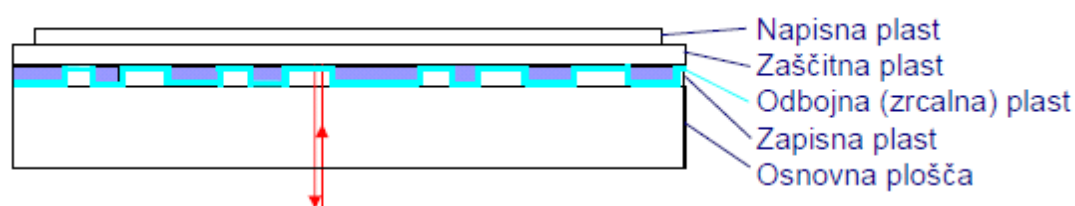
Diskete delujejo na istem principu kot trdi diski. Bralno-pisalna glava zapisuje in bere podatke na magnetnem disku, razdeljenem na sektorje. Za vrtenje magnetnega diska poskrbi motor v pogonski enoti. Realna hitrost prenosa podatkov je 125 kbit/s. Diskete so zaradi cenene izdelave zelo občutljive na zunanje vplive, kot so vlaga in magnetna polja.

Zaradi razvoja drugih nosilcev z večjo kapaciteto, kot so na primer prenosni trdi diski in SSD pogoni, optične pomnilne enote in USB ključki, so izdelovalci novejših matičnih plošč popolnoma opustili podporo disketam. V 90. letih je sicer bilo nekaj poskusov podaljšanja življenjske dobe s tako imenovanimi super diski s kapaciteto do 120 MB in Zip diski s kapaciteto do 750 MB, toda zaradi nezdržljivosti z ostalimi nosilci, visokimi cenami medijev in prihodom novejših in boljših tehnologij, se niso obdržali. Danes so diskete v glavnem uporabljene na starejših računalnikih, za izdelavo varnostnih kopij starih programov, kot zagonski medij ali za nadgradnjo BIOS-a.

2.1.6 OPTIČNE POMNILNE ENOTE

CD oziroma zgoščenka je bile razvite leta 1982 kot zamenjava vinilnih gramofonskih plošč. Prve zgoščene so bile uporabljene kot nosilci glasbe. Leta 1985 so tehnologijo glasbenih zgoščenk prilagodili shranjevanju podatkov v računalništvu. Za to obliko zgoščenk je uporabljena oznaka CD-ROM. Te zgoščene so premogle od 650 do 900 MB prostora in so se uporabljale za distribucijo programske opreme. Zapisljive zgoščene (CD-R) in večkrat zapisljive zgoščene (CD-RW) so še danes uporabljene za arhiviranje in prenos podatkov.

Zgoščene so mediji okrogle oblike z luknjo na sredini, preko katere os pogona omogoči vrtenje plošče. Zapisljive zgoščene sestavlja več plasti (Slika 9): osnovna plošča iz plastike, zapisna plast iz različnih organskih barvil, odbojna plast, zaščitna plast in napisna plast.



Slika 9: Sestava zapisljive zgoščene (Povzeto po [31])

Podatke na zgoščenko lahko pišemo na dva načina. Pri prvem načinu se v prosojno snov vtisnejo vdolbine, na to plast pa je nanescena odbojna plast. Na prehodu med ravnino in vdolbino se pri branju jakost odbitega laserskega žarka zmanjša. Pri drugem načinu se pod vplivom laserskega žarka z dovolj veliko močjo spremeni struktura materiala (iz kristalne preide v amorfno) in s tem zmanjša prosojnost. Na teh mestih je pri branju jakost odbitega laserskega žarka manjša. Laser z valovno dolžino 780 nm posveti na nastale vzorce. Fototranzistor glede na jakost odboja zazna različno dolžino v odbitem žarku in ga spremeni v binarne podatke. Zgoščene danes uporabljamo predvsem za glasbo.

Manjšanje valovne dolžine laserja je omogočila povečanje števila vzorcev na plošči in s tem večjo gostoto zapisa na optičnih pomnilnih enotah. Ta napredek je omogočil razvitje DVD-jev. DVD z valovno dolžino laserja 650 nm omogoča shranjevanje do 4,7 GB podatkov. Zamenjava materialov pri izdelavi plošče je omogočila dodatno povečanje kapacitete do 8,5 GB z uporabo dveh slojev. Pri dvoslojnih DVD-jih lahko laserski žarek sveti skozi prvi polprosojni sloj in tako prebere podatke iz drugega sloja. DVD-ji omogočajo tudi obojestranski zapis podatkov, tako da lahko dosežemo kapaciteto do 17,08 GB podatkov na ploščo. DVD-je se danes primarno uporablja za distribucijo filmov in programske opreme. Kot pomnilno enoto za prenos in shranjevanje podatkov so ga v glavnem zamenjale bolj priročne naprave, kot so USB ključki.

Podobno kot zgoščenke tudi DVD-je počasi zamenjujejo novejša tehnologija. Blu-ray plošča z valovno dolžino laserja 405 nm omogoča zapis 25 GB podatkov na sloj. Danes so Blu-ray plošče uporabljene predvsem za distribucijo filmov visoke ločljivosti. Zaradi še vedno visoke cene plošč in snemalnih enot ter tudi zaradi cenejših alternativ, kot so USB ključki, se uporaba Blu-ray plošč za prenos podatkov še ni razširila in verjetno se tudi ne bo.

2.2 POMNILNE ENOTE PRIHODNOSTI

V slabih 100 letih razvoja je bilo razvito veliko število različnih tehnologij za shranjevanje podatkov. Razvoj se ni ustavil, saj potreba po poviševanju kapacitete še naprej raste.

2.2.1 SE TRDI DISKI BLIŽAJO SMETIŠČU ZGODOVINE?

Trdi diski so eden od preferenčnih načinov shranjevanja podatkov z nami že dobrih 30 let in počasi se inženirji približujejo zgornji meji gostote zapisa pri trenutnih bralno-pisalnih glavah. Pri visokih gostotah zapisa se pojavi več težav, predvsem prihaja do težav s pregrevanjem materialov oziroma do tako imenovanega superparamagnetizma. Superparamagnetizem je pojav, kjer lahko energija, ki se sprošča v materialu med obračanjem magnetnega polja, zamenja tudi smer polja na sosednjih pozicijah.

Ena od ponujenih rešitev za to težavo je tako imenovani HAMR oziroma magnetni zapis s pomočjo toplote. S pomočjo te tehnologije je trenutno mogoče skoraj podvojiti gostoto zapisa na kvadratni palec. To naj bi dosegli z uporabo plošč, izdelanih iz posebne zlitine železa in cinka, ki je odporna na pojav superparamagnetizma. Težava te zlitine je, da ne omogoča zapisa podatkov, če ni predhodno segreta, zato načrtujejo, da bi se pred bralno-pisalnno glavo vgradil laser, ki bo predhodno segrel ploščo in s tem omogočil zapis podatkov.

Tehnologija magnetnega zapisa s pomočjo toplote je trenutno v razvoju pri vseh večjih proizvajalcih trdi diskov že zadnjih 10 let, toda do večjih prebojev prihajajo šele zdaj. Trenutne napovedi kažejo, da lahko prve izdelke, narejene s pomočjo te tehnologije, pričakujemo v naslednjih 2 letih. Po napovedih bo do leta 2020 HAMR omogočil izdelavo 3,5-palčnih diskov z do 60 TB prostora.

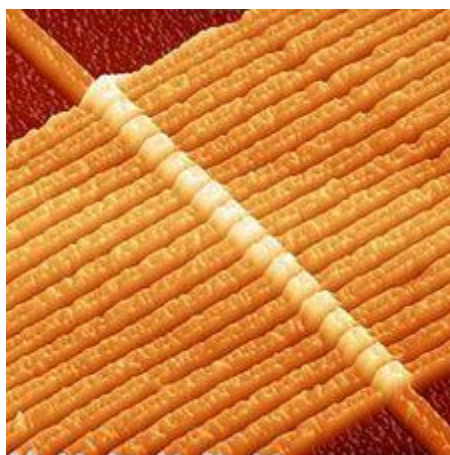
2.2.2 MEMRISTOR

Memristor (Slika 10) (zloženka iz angleških besed memory resistor – pomnilniški upornik) je novejši, pasivni, dvopolni elektronski element, zamišljen kot nelinearni element električnega vezja, ki povezuje električni naboj in magnetni pretok.

Ko teče tok skozi element v eni smeri, električni upor narašča, v nasprotni smeri pa pojenja. Če tok pade na nič, ko izključimo gonilno napetost, element ohrani zadnjo vrednost upora, če začne tok naboja ponovno teči, bo upor vezja enak zadnjemu aktivnemu. Delovna karakteristika memristorja v odvisnosti naboja od upora je približno linearna, dokler časovni integral toka ostaja znotraj določenih mej.

Teorijo memristorjev je izdelal in poimenoval Leon Ong Chua v svojem članku iz leta 1971. Leta 2008 je skupina iz Laboratorijev HP objavila, da bo začela razvijati preklopni memristor na podlagi tankega filma iz titanovega dioksida. Te elemente razvijajo za uporabo v nanoelektronskih pomnilnikih, računalniški logiki in nevromorfni računalniški arhitekturah.

Trenutno pričakujemo prve komercialne primere za leto 2013 oziroma za leto 2014. Nameravajo jo uporabiti kot nadomestilo za bliskoviti pomnilnik, DRAM in SRAM.



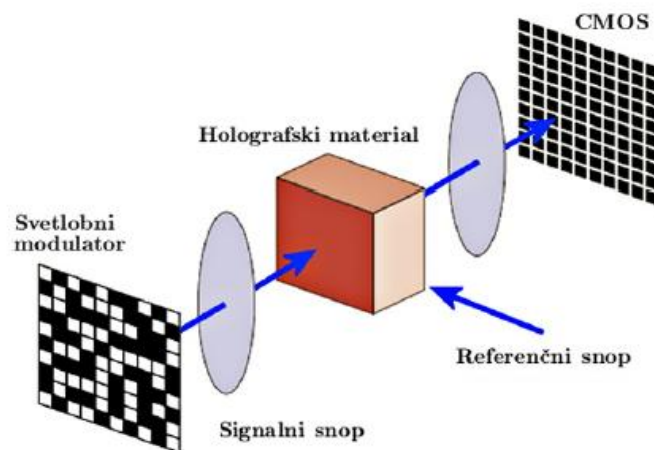
Slika 10: Sestava sedemnajstih namensko grajenih memristorjev iz deoksidiranega titanovega dioksida, zgrajenih v Laboratorijih HP (Povzeto po [9])

2.2.3 HOLOGRAFSKA PRIHODNOST

Blu-ray tudi ne predstavlja višek razvoja optičnih pomnilnih enot, bo pa verjetno zadnja, kjer bodo podatki zapisani le na površino diska. V ta namen se pripravlja holografsko tehnologijo zapisa. Osnovna ideja je shranjevanje podatkov v obliki hologramov (torej v treh dimenzijah). Pri tem uporabljamo ploščo, narejeno iz primerne materiala, ki je občutljiva na intenziteto vpadne svetlobe, kot so na primer kristali in polimeri.

Za pisanje na tak material uporabimo dva snopa svetlobe, in sicer signalnega in referenčnega, ki ustvarita holograme. Pri branju se uporabi le referenčnega, ki rekonstruira signalnega, v

katerem so zapisani podatki. Za signalni snop bi uporabili svetlobni modulator, ki bi bila neke vrste dvodimenzionalna mreže, kjer svetle točke predstavljajo stanje 1 in temne stanje 0. Z modulatorjem računalniško kreiramo primeren vzorec, skozi katerega sveti signalni snop, ki skupaj z referenčnim kreira hologram v plošči. Branje izvede referenčni snop, ki rekonstruira prvotni snop, tega nato odčita CCD ali CMOS detektor (Slika 11).



Slika 11: Osnovna ideja holografskega shranjevanja podatkov (Povzeto po [10])

V teoriji naj bi ta tehnologija omogočila veliko gostoto zapisa, s katero bi na ploščo velikosti današnjega DVD zapisali več kot 200 GB podatkov in to pri hitrosti branja in pisanja z več kot 10 GB/s.

2.2.4 NADALJNI RAZVOJ SSD POGONOV

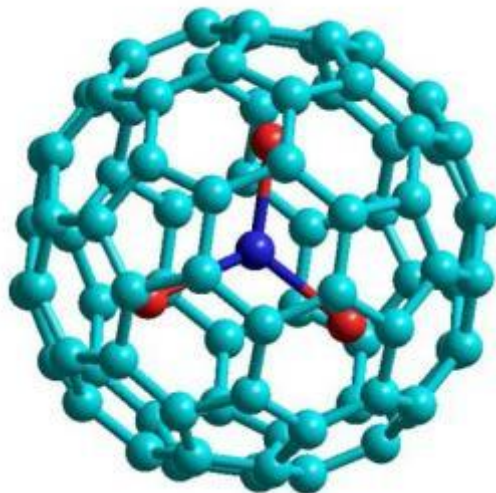
Trenutno razvoj stremi predvsem v smer odpravljanja oziroma omejevanja pomanjkljivosti, kot so cena in življenjska doba. Obe težavi trenutno poskušajo rešiti z izboljšavo materialov, novimi pristopi in boljšimi algoritmi za brisanje in pisanje. Nekateri inženirji poskušajo s hibridnimi rešitvami, kjer se za določena opravila uporablja polprevodniški del, za ostala pa se uporablja navadni magnetni disk. Tehnologija je še precej mlada, zato so vse poti odprte.

2.2.5 ZNANSTVENA FANTASTIKA?

Trenutni trend razvoja pomnilnih enot stremi k nadgrajevanju in izpopolnjevanju trenutno najbolj razširjenih tehnologij, torej takih, ki slonijo na magnetnem zapisu, zapisu na optične pomnilne enote in polprevodniških tehnologijah. Kljub sprotnim izboljšavam se neizbežno približujemo fizičnim mejam uporabljenih materialov, zato znanstveniki in inženirji počasi raziskujejo nove metode in materiale za zapis podatkov, ki še danes zvenijo znanstveno fantastične, a bodo morda v kratkem stalnica.

2.2.5.1 OGLJIKOVE NANOKROGLICE

Ideja se je pojavila pri raziskovanju metalno fullerelnih molekulah. Metalno fullerelne molekule so molekule sferične oblike, sestavljene iz 80 ogljikovih atomov, ki so v sredini strukture prazne (Slika 12). To ustvari neko vrsto kletke, v katero se lahko ujame železno spojino, načeloma sestavljeno iz enega dušikovega atoma in tremi železnimi atomi. Te molekule imajo posebne elektronske lastnosti, ki omogočajo zamenjavo orientacije posameznih molekul, kar je osnova za zapis podatka.



Slika 12: Model molekule iz 80 atomov ogljika z ujeta železno spojino iz dušika in železa
(Povzeto po [11])

2.2.5.2 SHRANJEVANJE V BAKTERIJE/DNK

Po trenutnih zamislih bi se ustvarilo umetno DNK zaporedje. To zaporedje bi se dodalo v genom navadne bakterije. Znanstveniki menijo, da bi na ta način bilo mogoče zapisati do 100 bitov podatkov v posamezni organizem. Trenutni poskusi so že omogočili zapis » $E=mc^2$ 1905« v DNK bakterije, ki živi v prsti.

Shranjevanje v DNK naj bi bilo idealno za shranjevanje podatkov, saj bi se ob razmnoževanju bakterij podatek sam podvojil v novem organizmu. S tem bi se samostojno ustvarjale nove varnostne kopije podatka.

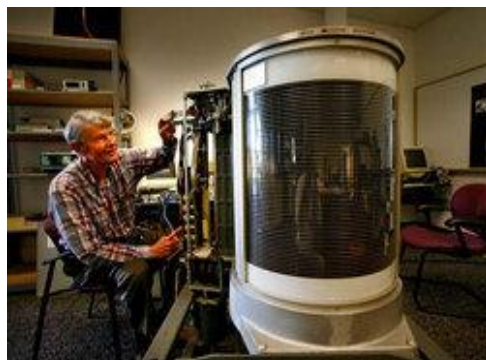
3 SESTAVA IN DELOVANJE GLAVNIH POMNILNIH ENOT – TRDI DISKI IN SSD POGONI

3.1 TRDI DISK

Shranjevanje na trdi disk (magnetni disk) je danes ena najbolj razširjenih oblik shranjevanja podatkov. Delujejo na istem principu kot diskete, torej na vrteči magnetni plošči, na kateri so shranjeni podatki, kjer se za dostop do teh podatkov uporabi premična bralno-pisalna glava.

3.1.1 KRATKA ZGODOVINA TRDEGA DISKA

Prvi trdi disk je bil pri IBM izumljen IBM 350 RAMAC (Random Access Method of Accounting and Control) leta 1956. Skoraj tono težka in kot dva hladilnika velika naprava je zmogla shranjevati 5 milijonov znakov podatkov na 50 plošč s premerom 24 palcev. Plošče so se vrtele pri hitrosti 1.200 vrtljajev na minuto, toda zaradi uporabe le ene bralno-pisalne glave je bil dostopni čas precej slab. Šele kasnejši modeli so uporabljali več bralno-pisalnih glav. Ena glavnih novosti, ki jih je RAMAC (Slika 13) vpeljal, je bilo naključno dostopanje do podatkov namesto sekvenčnega. Prvi disk za osebne računalnike je bil razvit tudi pri IBM leta 1980. Premogel je 5 MB podatkov in je bil velik 5,25 palcev.

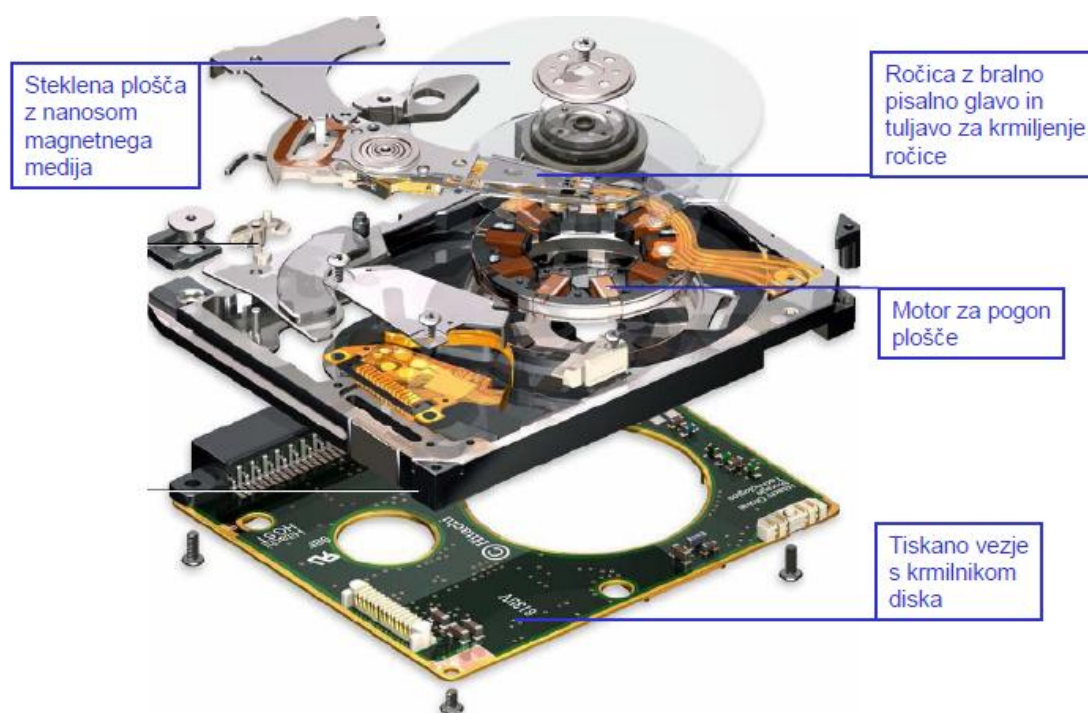


Slika 13: Prvi trdi disk RAMAC (Povzeto po [14])

3.1.2 ZGRADBA IN DELOVANJE

Trdi diski so sestavljeni iz različnih materialov. Glavni sestavni deli vseh trdih diskov so (Slika 14):

- plošče z magnetnim medijem in motor za pogon plošč;
- ročice z bralno-pisalnimi glavami;
- elektronika za branje in pisanje;
- elektromehanski servo in krmilni sistem;
- krmilnik in vmesnik do vodila.



Slika 14: Glavni sestavni deli vsakega trdega diska (Povzeto po [15])

3.1.2.1 PLOŠČA

Podatki na trdem disku so shranjeni na 1 do 10 plošč, prevlečenih z magnetno snovjo. Plošče so lahko iz različnih materialov, kot so na primer kovina, steklo ali keramika. Podatki so shranjeni na obe površini posamezne plošče (zgornja in spodnja). Posamezne plošče sestavlja več plasti:

1. mazivo – 1 nm;
2. ogljikova zaščita 5 – 1 nm;
3. magnetna plast CoXY – 9 nm;
4. rutenij – 0,6 nm;
5. mehko magnetna plast – 4 nm;
6. krom podlaga – 50—150 nm;
7. steklo ali keramika – 0,8—1 mm.

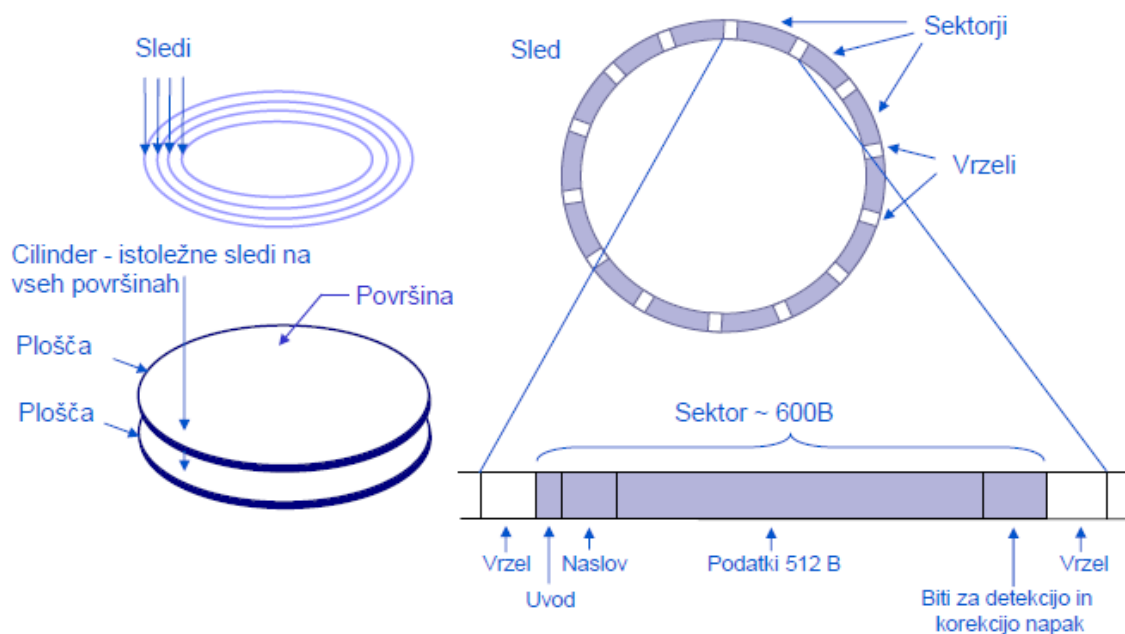
Plošče so nameščene na os diskovnega pogona, ki se med delovanjem vrtijo s konstantnim številom obratov. Današnje standardne hitrosti so 5.400, 7.200, 10.000 in 15.000 obratov na minuto. Najbolj pogoste hitrosti trdih diskov v prosti prodaji so 5.400 in 7.200 obratov na minuto. Zaradi konstantnega števila obratov je kotna hitrost vedno enaka, medtem ko je obodna hitrost na zunanjem robu plošče največja in na notranjem robu najmanjša.

Za pogon plošč se uporablja enosmerni (DC) motor brez krtačk. Os, na kateri so fiksno pritrjene plošče, je uležajena na obeh straneh. Uporabljeni ležaji so lahko kroglični, tekočinski (FDB Fluid Dynamic Bearing) ali zračni ležaji, ki so tišji in omogočajo višje hitrosti in večje gostote zapisa. Nenatančnost ležajev povzroča pri vrtenju premike osi in plošč, ki so pritrjene

na os. Ti premiki, znani kot NRRO (Non-Repeatable Runout), so glavni vzrok napačne postavitve bralno-pisalnih glav na sredino sledi – TMR (Track Miss-Registration).

Podatki na disku se zapisujejo v sledih (Slika 15). Sledi so koncentrične krožnice, razporejene po površini plošče, ki so ločene z manj kot 20 nm širokim zaščitnim pasom (po navadi 5—10 % razdalje med sledema). Zaradi krožnice je dolžina sledi pri 3,5-palčnih diskih približno 4,75 palcev na notranji strani in približno 11 palcev na zunanji strani. Za boljše izkoriščanje teh zunanjih sledi so sledi na disku razporejene v več con. Hitrost zapisa je v vsaki coni drugačna in narašča od notranjih proti zunanjim conam. Število sektorjev na sledih zunanje cone je zato večje kot na sledih notranje. Na vseh sledih v eni coni je hitrost zapisa enaka, zato je tudi število sektorjev na vseh sledih v eni coni enako. Tako imenovani conski zapis (ZBR Zoned Bit Recording) je način, ki se uporablja pri diskih za povečanje gostote zapisa. Posamezna sled na disku je naprej razdeljena na od 50 do 200 sektorjev. Število sektorjev je odvisno glede na pozicijo sledi. V notranjosti plošče je zaradi krajše sledi manjše število sektorjev. Večje število sektorjev je na zunanjem robu plošče, kjer je sled daljša.

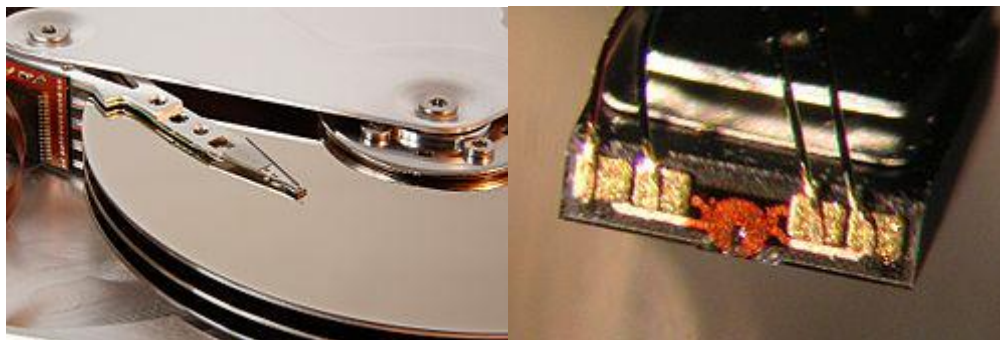
Sektor je najmanjša bralno-pisalna enota. Sestavlja jo uvod, podatkovni zapis, bit za detekcijo in korekcijo napak. Sektorje ločujejo vrzeli, ki ločujejo sosednje zapise. Vrzeli so potrebne, ker zaradi nenatančnosti vrtenja diska ni mogoče zagotoviti, da se bo zapis vedno zapisal natančno na isto mesto. Vsebina vrzeli ni definirana, v njej so po navadi ostanki prejšnjih pisanj.



Slika 15: Razdelitev plošče (Povzeto po [15])

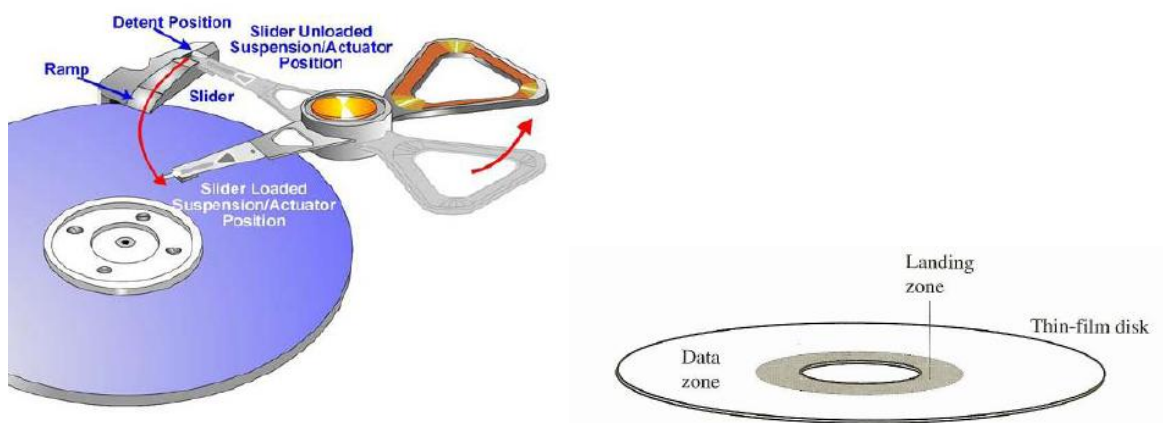
3.1.2.2 BRALNO PISALNA GLAVA

Vsaka površina diska ima svojo lastno bralno-pisalno glavo (slika 16), ki namagnetni površini diska (pisanje) ali zazna namagnetenost (branje). Glava ne drsi po površini diska, temveč lebdi na konstantni razdalji 3 nm s pomočjo zračne blazine, ki jo ustvari vrtenje plošč. Ta višina se z razvojem tehnologije manjša, saj nižje, kot je bralno-pisalna glava, višjo gostoto zapisa lahko dosežemo.



Slika 16: Glava in drsnik, ki lebdi na površini diska. Povečana slika bralno-pisalne glave (Povzeto po [16])

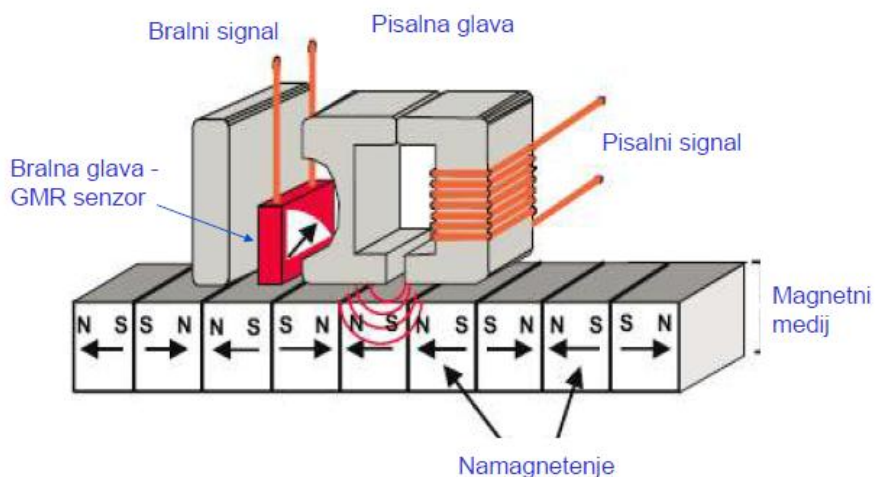
V času mirovanja (npr. ko je računalnik izključen) se glava dotika površine diska. Glava se dvigne, šele ko je dosežena dovolj visoka hitrost. Ta pojav imenujemo vzletanje in pristajanje bralno-pisalne glave. Glave in površine so narejene, tako da prenesejo vzletanje in pristajanje, toda kljub temu lahko pride s časom do obrabe. Da se temu izognemo, glava pristane na proti trenju prirejenem notranjem delu plošče, kjer ni zapisanih podatkov. Nekateri diski imajo plastično klančino na zunanjem delu plošče, kjer lahko glava pristane med mirovanjem (Slika 17).



Slika 17: Klančina za posamezno glavo in »pristajalna« steza na površini (Povzeto po [17])

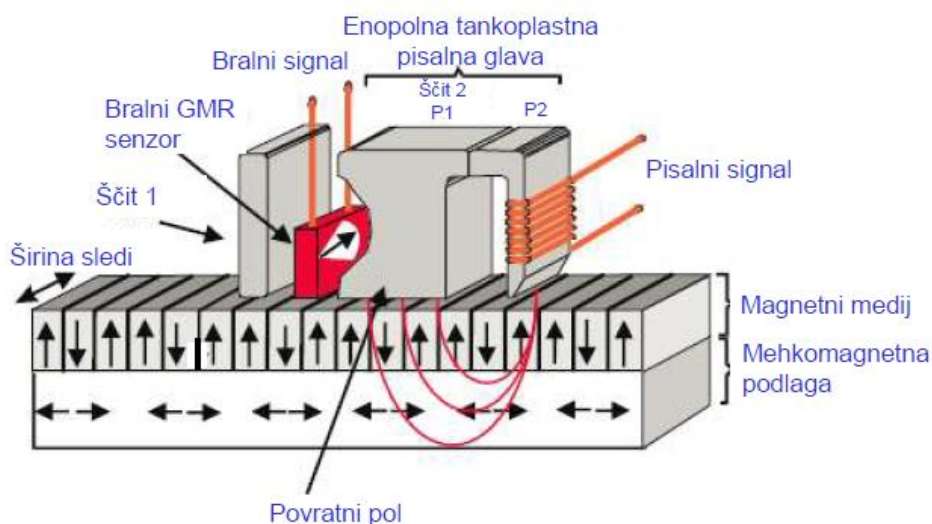
3.1.2.3 ZAPISOVANJE NA DISK

Podatek na disku je shranjen v obliki različno namagnetenih področij na magnetnem mediju. Do leta 2006 je bil prevladujoči način zapisa vzdolžni (longitudinalni) zapis (Slika 18). Pri vzdolžnem zapisu magnetne domene ležijo vzdolž magnetne plasti in nam omogoča največjo gostoto zapisa 120 GB/palec.



Slika 18: Vzdolžni (longitudinalni) zapis (Povzeto po [15])

Zaradi vse večje gostote zapisa postajajo namagnetena področja nestabilna in pride do superparamagnetizma, kjer se zaradi nastale energije pri zamenjavi usmeritve polov spremeni tudi namagnetenje sosednjih področij. Ta pojav trenutno preprečujemo z drugim načinom zapisa, in sicer leta 1970 izumljenim vertikalnim (pravokotnim) zapisom. Pri vertikalnem zapisu (Slika 19) so področja namagnetjenja daljša in se zato med seboj manj motijo. Predvideva se, da se bo lahko dosegla gostota zapisa 1.000 Gbitov/palec.



Slika 19: Vertikalni zapis (Povzeto po [15])

3.1.2.4 VMESNIK

Komunikacija med diskom in ostalimi enotami računalnika poteka po različnih vmesnikih. V domači uporabi sta najbolj pogosta vmesnika SATA (Serial Advanced Technology Attachment) s hitrostjo do 300 MB/s in starejši paralelni ATA s hitrostjo do 133 MB/s. Na delovnih postajah in strežnikih se načeloma uporablja vmesnik SCSI (Small Computer System Interface), ki ga sedaj zamenjuje SAS (Serial Attached SCSI) in optika – FC (Fibre Channel).

3.1.2.5 DOSTOPANJE DO PODATKOV IN FORMAT PODATKOV

Dostop do podatkov na disku sestavljajo trije koraki:

1. Iskanje sledi – pomik glave na iskano sled (cilinder). Iskalni čas na današnjih diskih je med 3 in 10 ms. Zniža se ga lahko s povišanjem hitrosti vrtenja, višjo gostoto zapisa in z defragmentacijo diska, ki združi povezane podatke na bližnje sektorje.
2. Vrtilna zakasnitev (latenca) – je zakasnitev, ki nastane, ko glava čaka, da se iskani sektor zavrti pod bralni mehanizem. Povprečna vrtilna zakasnitev je enaka polovici časa enega obrata diska. Pri diskih s 5.400 obrati na minuto znaša 5,5 ms ter pri diskih s 7.200 obrati na minuto znaša 4,2 ms.
3. Prenos podatkov – je čas prenosa podatkov. Odvisen je od notranje prenosne hitrosti in števila prenesenih sektorjev. Povprečna hitrost prenosa pri diskih s 7.200 obrati na minuto je 1,030 Mb/s (večja na robu diska, kjer je več sektorjev in manjša v notranjosti).

Da lahko shranjene podatke z diska zopet preberemo, morajo biti izpolnjeni naslednji pogoji:

- možnost izbire poljubne sledi na disku s premikom bralno-pisalne glave;
- preverjanje položaja bralno-pisalne glave;
- dobro definirana referenčna točka;
- možnost večkratnega pisanja vzdolž sledi;
- lociranje predhodno zapisanih zapisov;
- določanje začetka zapisa;
- detekcija in korekcija napak pri branju;
- identifikacija neuporabnih delov diska.

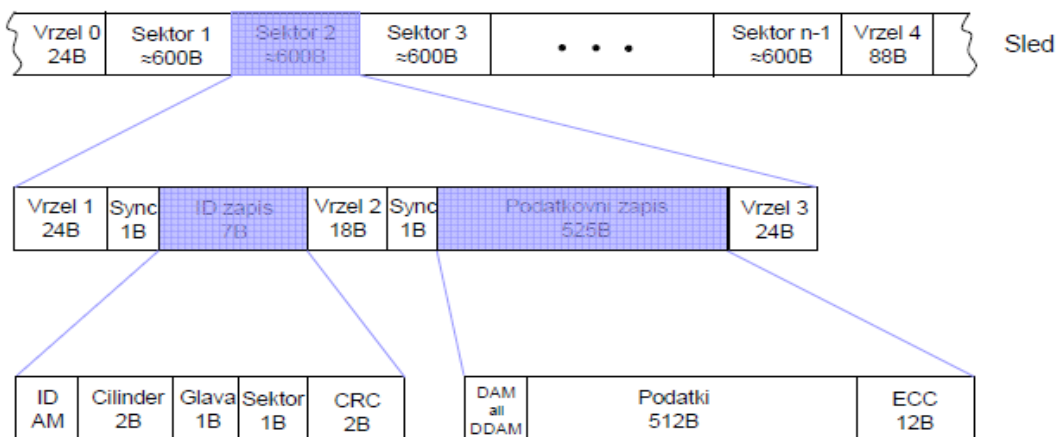
To nam omogoča format zapisa na sledi (Slika 20), ki ga sestavljajo:

Uvod, imenovan tudi adresna marka, je enolična kombinacija bitov, ki določa začetek sektorja oziroma zapisa na sektorju.

Podatkovni zapis je del sektorja, v katerem so shranjeni podatki in je načeloma dolg 512 bajtov. To je najmanjša enota, ki ima na disku svoj naslov.

Biti za detekcijo in korekcijo napak so biti, ki se izračunajo pri vsakem pisanju v podatkovni zapis. Standardno jih je 64 ali 128 in se zapišejo na koncu podatkovnega zapisa. Uporablja se jih pri branju za detekcijo napak in morebitno popravljanje le-teh. Uporablja se tehniki CRC – Cyclic Redundancy Check in ECC – Error Correcting Codes.

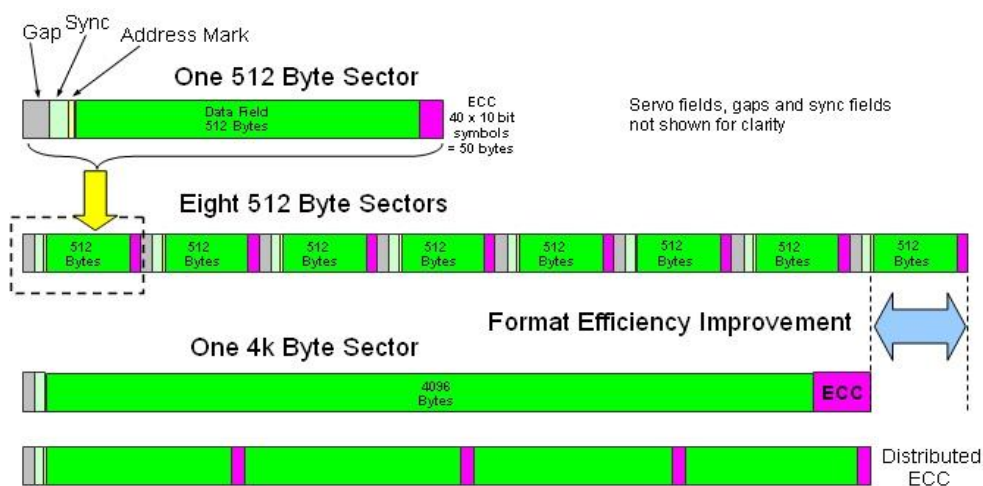
Servozapis služi pravilni postavitvi bralno-pisalne glave na sredino sledi. Brez servozapisa bi bilo pri tako majhnih dimenzijah nemogoče postaviti bralno-pisalno glavo točno na sredino sledi. Servozapis se nahaja na sledi in v prostoru med sledema. V obliki loka se razteza od notranje (kjer je krajši) do zunanje sledi (kjer je daljši). Pisan je vedno z enako frekvenco. Servozapis je izdelan že v tovarni pri izdelavi diska in ga ni mogoče spreminjati. Del informacije, ki jo servozapis vsebuje, je številka sledi in številka sektorja. Na površini plošče je lahko od 50 do 200 enakomerno razporejenih servozapisov.



Slika 20: Primer formata zapisa na sledi na trdem disku (Povzeto po [15])

3.1.2.6 NAPREDNI FORMAT

Napredni format (Advance Format – AF) je bodoča oblika formata zapisa podatkov na disku (Slika 21). Elementi bodo ostali enaki (uvod, podatki, bit za detekcijo napak), toda podatkovni del se bo povečal iz 512 na 4.096 bitov. V praksi se 8 sektorjev združi v enega in se s tem pridobi približno 11 % več prostora. Poveča se tudi prostor za detekcijo napak, kar omogoča uporabo novih algoritmov za prepoznavanje napak.

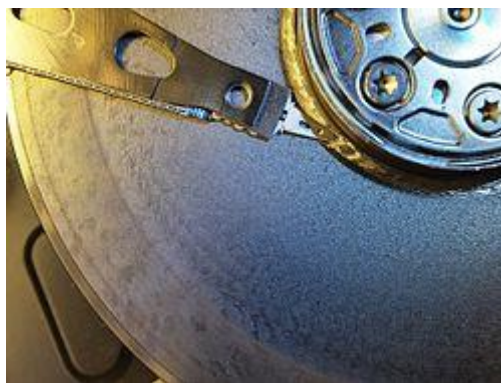


Slika 21: Primer naprednega formata (Povzeto po [18])

3.1.3 OKVARE

Do okvare trdega diska pride, kadar pri pravilno nastavljenem računalniškem sistemu ne moramo več dostopati do podatkov. Okvara se lahko pojavi med normalnim delovanjem ali zaradi zunanjih vplivov, kot so udarec, voda, magnetno valovanje ...

Med najbolj pogostimi okvarami je sesutje glave (Slika 22). Do tega pride, kadar bralno-pisalna glava trči ali podrsa ploščo diska. Sesutje glave lahko povzroči večjo izgubo podatkov in tudi otežuje njihovo reševanje, saj lahko disk brez primerne opreme še bolj poškodujemo. Podobno lahko disk poškoduje tudi prah v primeru slabo nameščenih zračnih filtrov. Prah, ki uide skozi filter, se lahko usede na ploščo ter povzroči sesutje glave in nastanek slabih sektorjev (»bad sector«). Poleg sesutja glave se lahko na disku poškoduje elektronika, na primer ob udaru strele.



Slika 22: Poškodbe na plošči, nastale zaradi sesutja glave (Povzeto po [19])

Trdi diski so mehanske naprave in zato nagnjeni k okvaram zaradi obrabe, kar pomeni, da se s časoma vsi diski pokvarijo. Zaradi tega izdelovalci diskov pri prodaji večkrat podajo statističen podatek MTBF (Mean Time Between Failures). Podatek MTBF nam pove, povprečno koliko časa preteče med dvema napakama. Današnji zmogljivi diski se ponašajo z vrednostmi, kot je 1,2 milijona ur. Žal nam ta podatek ne pove resnično življenjsko dobo diska, saj ne upošteva prej omenjenih sesutij glav, zunanje vplive, kot so udarci ali izključitev napajanja. Načeloma velja, da če se disk ne pokvari v prvih mesecih, ima večjo možnost za daljšo življenjsko dobo.

Okvar diska ne moremo preprečiti, toda obstajajo sistemi, ki pripomorejo k večji zanesljivosti in opozarjanju pred okvarami. Pri diskih na prenosnikih se uporablja predvsem sisteme z akcelerometri, ki zaznajo večji pospešek in vibracije ter preventivno odmaknejo glave s površine diska. Poleg tega so diski v prenosnikih nameščeni na ležaje, ki zmanjšujejo vpliv zunanjih vibracij. Vsi moderni diski so tudi opremljeni s S.M.A.R.T. (Self-Monitoring, Analysis, and Reporting Technology), ki nas preko različnih atributov opozori na morebitne bodoče okvare.

3.1.4 IZPELJANKE TRDIH DISKOV

3.1.4.1 HIBRIDNI DISKI

Koncept hibridnih diskov se je pojavil z Intelovo tehnologijo Robson, ki je napovedovala povezavo bliskovnega pomnilnika z matično ploščo. Glavni katalizator izrabe tehnologije bliskovitega pomnilnika pri dostopu do mehanskih pomnilnih enot naj bi bil sistem Windows Vista, vendar se zdaj o tem govori vse manj. Razlogov je več, osrednji je ta, da rezultati v praksi ne govorijo o drastičnem upadu energijske porabe oziroma o blazno hitrejšem delovanju računalnika, nalaganju aplikacij in zaganjanju operacijskega sistema.

Hibridni trdi disk je standardni trdi disk, ki ima na tiskanem vezju poleg 8 ali 16 MB hitrega predpomnilnika še 128—1024 MB bliskovnega pomnilnika. V bliskoviti pomnilnik beleži najpogostejše zapise oziroma ob zaporednih sekvenčnih branjih podatkov vanj pred samo zahtevo naloži podatke, za katere predvideva, da jih bo sistem zahteval v prihodnosti. Če je ta sistem predvidevanja uspešen, se lahko disk ustavi, in medtem ko uporabnik prazni podatke iz bliskovnega predpomnilnika, varčuje z energijo.

3.1.4.2 ZELENi TRDI DISKI

Zeleni trdi diski vsebujejo posebno logiko, ki odvisno od bremena (ali uporabnik dostopa do podatkov ali so samo občasne zahteve) prilagaja hitrost vrtenja plošč ter s tem uravnava optimalno porabo energije. Če uporabnik začne z množičnim dostopanjem do podatkov, se plošče diska začnejo vrteti z najhitrejšimi vrtljaji (7.200 obratov na minuto) in v nasprotnem primeru se upočasnijo na 5.400 obratov na minuto.

Tehnologijo danes ponujajo vsi večji izdelovalci. Zanimivo je, da so bili prvi modeli ponujeni na področju namiznih računalnikov (3,5-palčni diski), ki so bili že od nekdaj precej potratnejši kot prenosni. Ni odveč poudariti, da je rešitev uspešna, saj zniža tudi segrevanje in šum delovanja takega diska. Hkrati je dejanska hitrost diska dokaj blizu navadnemu disku.

3.2 POLPREVODNIŠKE POMNILNE ENOTE

Polprevodniške pomnilne enote so naprave, ki podatke shranjujejo v obstojni pomnilnik, kot je bliskoviti pomnilnik, in neobstojni pomnilnik, kot je DRAM (dinamičen RAM). Med te naprave štejemo polprevodniške diske (t. i. SSD pogon), spominske kartice in USB ključke.

3.2.1 BLISKOVITI POMNILNIK

Bliskoviti pomnilnik je tip obstojnega pomnilnika, ki ga je možno električno izbrisati in reprogramirati. Razvili so ga iz električno zbrisljivega polprevodniškega bralnega pomnilnika (EEPROM). Podatki, shranjeni v pomnilniku, ostanejo tudi ob izklopu napajanja.

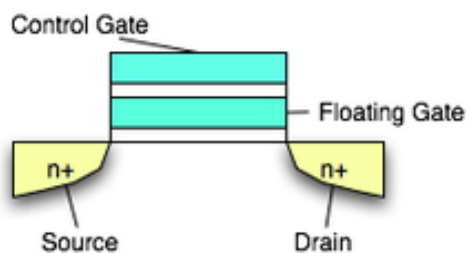
Delimo ga na dve različici NOR in NAND (Tabela 1). Slednjega zaradi nižje cene in večje gostote uporabljamo za različne pomnilne naprave, kot so USB ključki, pomnilne kartice in SSD pogone. NOR omogoča pravi naključni dostop in direktno zaganjanje kode, zato se ga uporablja predvsem za BIOS.

Lastnosti flash pomnilnikov	NOR flash pomnilniki	NAND flash pomnilniki
Tipična uporaba	Pomnilnik za BIOS	USB ključki
Najmanjša enota dostopa v bajtih	512B	2048B
Čas za branje v μ s	0,08 μ s	25 μ s
Čas za pisanje μ s	10,0 μ s	1500 za brisanje+250 μ s
Hitrost prenosa - branje v MB/s	10 MB/s	40 MB/s
Hitrost prenosa - pisanje v MB/s	0,4 MB/s	15 MB/s
Obraba (število pisanj na celico)	100.000	10.000 do 100.000
Cena na GB (maj 2008)	65 USD	4 USD

Tabela 1: Ključne razlike med NOR in NAND pomnilnikom (Povzeto po [15])

Bliskoviti pomnilnik shranjuje podatke v polje pomnilnih celic, sestavljenih iz tranzistorjev s plavajočimi vrati (FGMOS – floating-gate MOSFET). Celice delimo na enostopenjske (SLC), ki shranijo le en bit informacije, in na večstopenjske (MLC) celice, ki lahko shranijo več bitov. Zaradi večje gostote zapisa so večstopenjske celice cenejše, toda so v nasprotju z dražjimi enostopenjskimi celicami počasnejše in se prej obrabijo.

FGMOS (Slika 23) je posebna vrsta MOSFET tranzistorja (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, železno-oksidni polprevodni tranzistor z učinkom polja), ki ima namesto enih vrat dvoje. Podobno kot pri ostalih MOS tranzistorjih so na vrhu kontrolna vrata (CG). Na dnu se nahajajo plavajoča vrata (FG), ki so izolirana s plastjo oksida. Plavajoča vrata so električno izolirana, kar omogoča ujetje elektrona tudi za več let. Ujet naboj delno izniči električno polje na kontrolnih vratih in s tem spremeni pragovno napetost celice. Med branjem se preizkusi prevodnost MOSFET kanala. Zaznano prevodnost se nato oblikuje v binarno kodo. V večstopenjskih celicah se zazna količino toka in določi stopnjo naboja na plavajočih vratih. Nasprotno se v enostopenjskih celicah preverja le prisotnost ali odsotnost toka.



Slika 23: Plavajoča vrata prikaz tranzistorja (Povzeto po [22])

Glavna omejitev bliskovitega pomnilnika je omejeno število bralno-pisalnih ciklov. Večina današnjih izdelkov z bliskovitim pomnilnikom premore okoli 100.000 bralno-pisalnih ciklov. Strojna oprema ali gonilniki naprave skrbijo, da je uporaba celic čim bolj enakomerna. Za podaljšanje življenjske dobe se uporablja tudi tehnika upravljanja s slabimi sektorji, ki ob primeru napake pri branju preslika v rezervne sektorje.

3.2.2 SPOMINSKE KARTICE

Spominske kartice so prenosne pomnilne enote, ki uporabljajo bliskoviti pomnilnik. Prve spominske kartice, PC card, so se pojavile v 90. letih. Danes obstaja več kot 25 različnih vrst formatov, ki načeloma niso združljivi med seboj. Prevladujoč format je SD kartica in njeni izpeljanki mini in micro, ki premorejo tudi do 2 TB podatkov. Spominske kartice se uporablja predvsem v različnih prenosnih aparatih, kot so mobilni telefoni, mp3 predvajalniki, fotoaparati, igralne konzole ...



Slika 24: Najbolj razširjena vrsta spominskih kartic – SD kartice (Povzeto po [23])

3.2.3 USB KLJUČKI

USB ključek je pomnilna enota z bliskovitim pomnilnikom in integriranim USB vmesnikom. Glavne prednosti USB ključkov so: prenosljivost, majhnost, večkratno pisanje, visoka kapaciteta (danes do 1 TB) in višja hitrost v primerjavi z ostalimi prenosnimi pomnilnimi enotami. Zaradi teh lastnosti so USB ključki izpodrinili ostale prenosljive pomnilne enote, kot so diske, zgoščenke in DVD-ji. Poleg shranjevanja in prenosa podatkov se lahko ključke uporablja tudi kot nosilce aplikacij in računalniških sistemov, brez potrebe po predhodni

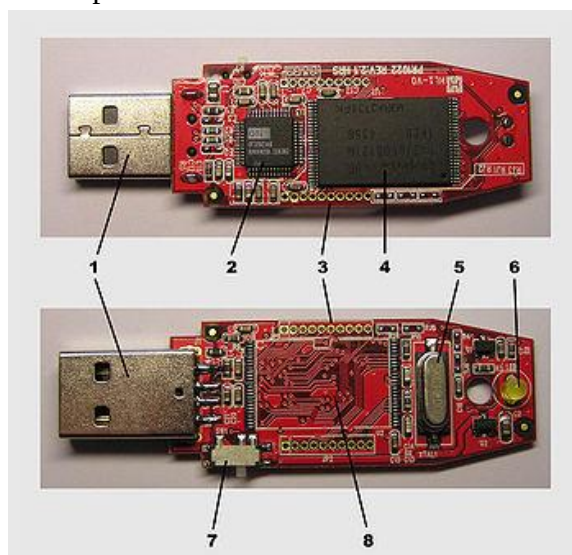
namestitvi. Predvsem je popularna uporaba ključkov kot nosilcev različnih »Live« distribucij Linux operacijskega sistema.

Vse USB ključke sestavljajo naslednje komponente (Slika 25):

- standardni USB priključek, ki služi za povezavo med ključkom in računalnikom;
- vezje z mikro krmilnikom;
- čip z NAND bliskovitim pomnilnikom, kjer so shranjeni podatki. Po navadi se uporablja večstopenjske celice, toda obstajajo primerki z enostopenjskimi celicami;
- kristalni oscilator, ki skrbi za delovanje interne ure naprave.

Poleg teh delov lahko USB ključki vsebujejo tudi:

- mostičke in nožice, uporabljene pri izdelavi in za naložitev kode v mikro krmilnik;
- LED lučko;
- stikalo za zaščito podatkov, ki prepreči pisanje;
- prostor za dodaten čip, ki omogoča uporabo istega vezja za različne velikostne modele;
- zaščito za USB priključek;
- prostor za vstavitev pomnilne kartice.



Slika 25: Glavni sestavni deli USB ključka – 1. USB priključek, 2. krmilnik, 3. mostički za testiranje, 4. bliskoviti pomnilnik, 5. kristalni oscilator, 6. LED, 7. stikalo za zaščito podatkov, 8. prostor za dodaten bliskoviti pomnilnik (Povzeto po [24])

3.2.4 SSD POGONI

Pomnilniški disk oziroma SSD pogon je naprava za shranjevanje podatkov, ki ne uporablja mehanskih delov. Podatki, shranjeni na SSD pogonih, so shranjeni v obliki električnega naboja v obstojnem bliskovitem pomnilniku ali neobstoječem dinamičnem pomnilniku DRAM. SSD pogoni predstavljajo direktno konkurenco današnjim trdim diskom kot način za trajno shranjevanje podatkov.

Sprva so bili SSD pogoni namenjeni uporabi v kritičnih aplikacijah, kot so sistemi za telekomunikacije, trgovanje, vojaški sistemi ... Uporabljalo se jih je tudi za poganjanje aplikacij, kjer višje hitrosti močno pripomorejo k učinkovitosti delovanja, kot so na primer aplikacije za obdelavo zvoka, slike in filma. Nižanje cen po letu 2009 je močno razširilo krog uporabnikov predvsem v obliki systemskega diska.

3.2.4.1 RAZVOJ

Ideja za SSD pogone se je pojavila že v 50. letih v času računalnikov s katodnimi cevmi, ko so nameravali uporabiti magnetna pomnilna jedra kot pomnilno enoto. Zaradi razvoja cenejšega magnetnega bobna je bila ideja opuščena. V 70. letih so se pojavili novi poskusi z električno spremenljivim ROM (EAPROM), ki je deloval podobno kot današnji NAND. Toda zaradi visoke cene in nizke življenjske dobe je bila tehnologija opuščena. Šele leta 1976 se je na tržišču pojavil Bulk Core, ki z 2 MB prostora velja za prvi SSD pogon.

Prvi moderni SSD pogoni so se pojavili na tržišču šele leta 1995. Pri M-Systems izdelani SSD pogoni so se naslanjali na bliskoviti pomnilnik. Zaradi visoke odpornosti na ekstremne pogoje, kot so udarci, tresljaji in velike temperaturne razlike, so jih uporabljali predvsem v vojaških in letalskih sistemih. Leta 2007 se pojavijo prvi SSD pogoni na PCI express vodilu in le dve leti kasneje so bili predstavljeni prvi SSD pogoni na klasičnem SATA vmesniku z do 6 Gbit/s prenosa.

3.2.4.2 ARHITEKTURA IN DELOVANJE

Ključni komponenti vsakega SSD pogona sta krmilnik in pomnilnik, kjer so shranjeni podatki. Pomnilni del so sprva sestavljali neobstojni DRAM pomnilniki, ki ga je danes večinoma zamenjal obstojni NAND bliskoviti pomnilnik. Ostale komponente imajo manjši vpliv na delovanje in so različne od proizvajalca do proizvajalca.

KRMILNIK

Vsi SSD pogoni vsebujejo krmilnik, ki služi kot most med NAND pomnilnikom in računalnikom, v katerem je disk vgrajen, in je eden od najpomembnejših faktorjev, ki določa zmogljivost diska. Krmilnik skrbi tudi za:

- zaznavo in odpravljanje napak (ECC);
- regulacijo obrabe;
- označevanje slabih sektorjev;
- preprečevanje bralnih motenj;
- bralno-pisalni predpomnilnik;
- čiščenje pomnilnika in obnavljanje pomnilniškega prostora;
- enkripcijo.

Hitrost SSD pogona naraste s številom vzporedno vezanih NAND čipov. Posamezni NAND čip je počasen zaradi ozkega 8/16 bitnega asinhronnega vhoda-izhoda in zaradi relativno visoke zakasnitve pri osnovnih vhodno-izhodnih operacijah. Z večjim številom vzporednih NAND čipov se poveča pasovna širina. Visoko zakasnitev se lahko skriva s prerazporeditvijo nalog na posamezne čipe. Micron in Intel sta za pohitritev prvih SSD pogonov uporabila podobno strukturo, ki jo srečamo v RAID 0 sistemih. To je omogočalo nastanek zelo hitrih SSD pogonov s hitrosti branja oz. pisanja do 250 MB/s pri 3 Gbit/s SATA vmesnikih leta 2009. Danes je z nadgradnjo te tehnike in stiskanjem podatkov na samem krmilniku izdelovalec krmilnikov SandForce dosegel hitrost branja oz. pisanja 500 MB/s pri 6 Gbit/s SATA vmesniku.

POMNILNIK

Večina današnji SSD pogonov temelji na obstojnem NAND bliskovitem pomnilniku. Glavna prednost bliskovitega pomnilnika je nižja cena kot DRAM in obstojnost podatkov tudi po prekinitvi napajanja. SSD pogoni na bliskovitem pomnilniku so daleč počasnejši kot različice na DRAM in prvi primerki so bili počasnejši tudi od klasičnih magnetnih diskov. Ta težava je bila z razvojem kvalitetnejših in zmogljivejših krmilnikov po letu 2009 odpravljena. Zaradi kompaktnosti komponent obstajajo tudi manjše izpeljanke. Uporablja se lahko dve različni vrsti NAND celic, in sicer večstopenjske MLC celice, ki omogočajo shranjevanje več bitov, in enostopenjske SLC celice, kjer lahko vsaka celica shrani le en bit. Večina MLC NAND celic ima 4 različna stanja in lahko zato shrani do dva bita informacij. Zaradi te strukture so MLC celice počasnejše, imajo nižje število prepisov in so manj zanesljive od SLC celic. Glavna prednost MLC celic je nižja cena in so zato uporabljene v večini navadnih SSD pogonov. Strežniške različice SSD pogonov zaradi višje zanesljivosti in hitrosti uporabljajo SLC NAND celice.

SSD pogoni, ki temeljijo na neobstoječem DRAM pomnilniku, se ponašajo z zelo nizkimi dostopnimi časi (pod 10 ms). Uporablja se jih predvsem za pospešitev delovanja aplikacij, kjer bi jih visoka zakasnitev bliskovitih SSD pogonov in klasičnih magnetnih diskov upočasnila. Zaradi neobstoječnosti DRAM pomnilnika so ti diski opremljeni z interno baterijo ali zunanjim napajanjem in z dodatnim sistemom za ustvarjanje varnostne kopije, ko naprava ni pod napajanjem. V primeru izpada napajanja se s pomočjo interne baterije podatki iz pomnilnika prenesejo v varnostno kopijo. Po ponovni vzpostavitvi napajanja se podatki prenesejo nazaj v pomnilnik in disk normalno deluje naprej. DRAM module, ki jih uporabljamo pri teh diskih, so enaki tistim, ki so uporabljeni v navadnih računalnikih in strežnikih. To omogoča preprosto zamenjavo posameznih modulov.

PREDPOMNILNIK

Podobno kot klasični magnetni diski so tudi SSD pogoni z bliskovitim pomnilnikom opremljeni z majhno količino DRAM pomnilnika, ki služi kot predpomnilnik. Poleg tega se v predpomnilniku nahaja imenik posameznik blokov in podatki o obrabi posameznih celic.

BATERIJA

Visoko zmogljivi SSD pogoni, ki večinoma temeljijo na neobstoječih tipih pomnilnika, potrebujejo stalno napajanje, da se prepreči izguba podatkov. To napajanje po navadi pride v obliki kondenzatorja ali interne baterije. Pri SSD pogonih, ki uporabljajo MLC celice v primeru izpada napajanja, lahko pride do tako imenovanega pojava pokvarjenosti spodnjih strani med programiranjem zgornje strani, kar lahko poškoduje tudi prej varne podatke. Tega pojava ni pri SLC celicah. Večina SSD pogonov v prosti prodaji ni opremljena z baterijami.

VMESNIK

SSD pogoni lahko podobno kot magnetni diski koristijo različne vrste vmesnikov. SATA, USB in PCI express vmesnike po navadi srečamo v računalnikih za domačo uporabo. SCSI in optične kanale se ekskluzivno uporablja na strežnikih.

3.2.2 PRIMERJAVA S SPOMINSKIMI KARTICAMI

Spominske kartice in večina SSD pogonov uporablja isto vrsto bliskovitega pomnilnika, kljub temu služijo popolnoma drugačnim namenom in tržiščem. Vsak ima svoje attribute, ki jih optimizira namenjeni uporabi.

Namen SSD pogonov je trajna vgraditev v računalnik kot zamenjava trdega diska ali za delovanje ob trdem disku, zato prihajajo v podobnih oblikah kot trdi diski. Prvotni namen spominskih kartic (SD kartice, Compact Flash, Memory stick ...) je bila vgradnja v digitalne fotoaparate, toda s časoma je prešla tudi v mobilne telefone, GPS enote, igralne konzole ... Zaradi tega so spominske kartice načeloma zelo majhne in narejene, tako da omogočajo preprosto izmenjavo. S pomočjo adapterjev je mogoče spominske kartice povezati na računalnik kot neko vrsto SSD pogona, in sicer kot pomožno enoto. Spominske kartice so načeloma 3- do 4-krat počasnejše od SSD pogona in zato neprimerne za uporabo kot primarna pomnilna enota. Niso prilagojene številu branj in pisanj, izvedenih ob normalni uporabi računalnika.

4 PRIMERJAVA SSD POGONOV IN TRDIH DISKOV

4.1 ZAGON

Pri SSD pogonih je zagon skoraj takojšen, ker nima nobenih mehanskih delov, ki bi potrebovali predpripravo. Treba je počakati le nekaj milisekund, da se zbudi iz varčevalnega načina. Pri trdih diskih je potrebnih nekaj sekund, da se plošče začnejo vrteti.

4.2 NAKLJUČNI DOSTOP

SSD pogoni se ponašajo z dostopnim časom okoli 0,1 ms, ker lahko podatke berejo direktno iz bliskovitega pomnilnika. Na trdih diskih znaša čas dostopa med 2,9 (na strežniških diskih) in 12 ms zaradi potrebe po premikanju glav in čakanja, da se podatek zavrti pod bralno-pisalno glavo.

4.3 ZAKASNITEV PRI BRANJU

Zakasnitev pri branju je pri SSD pogonih zelo nizka, ker lahko direktno berejo katero koli lokacijo. To zelo pospeši zagon in delovanje določenih aplikacij. Pri trdih diskih je zaradi mehanskih delov zakasnitev načeloma visoka.

4.4 HITROST PRENOSA

SSD tehnologija se ponaša z dokaj konstantnimi bralno-pisalnimi hitrostmi. Vendar se hitrost zmanjša, če se dostopa do več posameznih malih blokov. Potrošniški diski imajo hitrosti od 100 do 500 MB/s, medtem ko imajo strežniške izvedenke prenos po več gigabitov na sekundo.

Strežniški diski lahko dosegajo hitrosti do 140 MB/s. Visoka razdrobljenost podatkov lahko zelo zniža to hitrost. Hitrost prenosa podatkov je odvisna tudi od hitrosti vrtenja plošč, ki je med 4.200 in 15.000 obratov na minuto, in od pozicije sledi na plošči (hitrejša na zunanjem robu plošče in počasnejša na notranjem robu plošče).

4.5 STALNA HITROST BRANJA

Hitrost branja na SSD pogonih ni odvisna od pozicije podatkov, medtem ko so lahko podatki zaradi razdrobljenosti porazdeljeni na več pozicijah na plošči trdega diska. To lahko zelo poveča čas iskanja podatkov in s tem zniža hitrost branja.

4.6 RAZDROBLJENOST

Razdrobljenost podatkov ne vpliva na delovanje SSD pogona. Manjšanje razdrobljenosti (defragmentacija) je lahko škodljiva za SSD pogone, saj se NAND celice zaradi večjega števila prepisov prej obrabijo. Na trdih diskih lahko pojav razdrobljenosti, predvsem pri velikih datotekah, precej zniža hitrost delovanja, zato je priporočljivo redno zmanjšanje razdrobljenosti, da se obdržijo optimalne hitrosti.

4.7 GLASNOST

SSD pogoni nimajo premičnih delov, zato so v praksi neslišni. Trdi diski so zaradi večjega števila premičnih delov, kot so glava in plošče, lahko glasni. Glasnost je sicer različna od diska do diska in je po navadi nižja od hladilnega sistema računalnika.

4.8 NADZOR TEMPERATURE

SSD pogoni ne potrebujejo posebnega hlajenja in so veliko bolj odporni na visoke temperature kot trdi diski. Modeli na PCI express vodilu so lahko opremljeni s hladilnimi rebri za lažje odvajanje toplote. Trdi diski so zelo občutljivi na temperature, saj lahko že temperature okolja nad 35 °C skrajšajo življenjsko dobo diska, medtem ko lahko temperature okoli 55 °C znižajo zanesljivost. V takih primerih je priporočeno dodatno hlajenje z ventilatorji.

4.9 DELOVANJE NA VISOKIH VIŠINAH

SSD pogoni lahko brez posebnega prirejanja delujejo na visokih višinah, medtem ko morajo biti trdi diski posebej prirejeni. Zaradi tega se SSD pogone pogosto uporablja v letalski in vojaški industriji.

4.10 OBČUTLJIVOST NA ZUNANJE VPLIVE

SSD pogoni so zelo vzdržljivi na tresljaje in udarce. Trdi diski so zaradi lebdenja glave zelo občutljivi na tresljaje in udarce, saj lahko le-ti povzročijo sesutje glave in s tem poškodbo podatkov na plošči.

4.11 NAMESTITEV

SSD pogoni in večina današnjih trdih diskov ni občutljiva na orientacijo namestitve. Trde diske je vseeno priporočljivo namestiti, tako da bo čim manjši vpliv vibracij.

4.12 OBČULJIVOST NA MAGNETNA POLJA

Magnetizem nima vpliva na delovanje bliskovitega pomnilnika. Magnet lahko poškoduje podatke, shranjene na plošči trdega diska. Ohišje diska načeloma nudi zadovoljivo zaščito za plošče.

4.13 TEŽA

SSD pogon je skupek pomnilnih čipov na vezju in je zaradi tega načeloma majhen in lahek. Zaradi lažjega rokovanja in uporabe je ohišje podobno tistemu, kot ga imajo trdi diski (uporablja se iste formate 1,8, 2,5 in 3,5 palcev). Standardni trdi disk je kljub istim meram težji in tehta okoli 700 gramov.

4.14 ZANESLJIVOST IN ŽIVLJENSKA DOBA

SSD pogoni nimajo pomičnih delov, zato se mehansko ne morejo pokvariti. Vsak blok bliskovitega pomnilnika ima omejeno število prepisov, preden se pokvari. Krmilnik skrbi, da se poraba blokov enakomerno razporedi in se s tem poveča življenjska doba. Življenjska doba je od proizvajalca do proizvajalca različna in je popolnoma odvisna od uporabe. Na primer Intel za svoje 80 GB X25-M diske obljublja 5 let delovanja pri uporabi 100 GB/dan. Poraba v domačem okolju je seveda manjša in je po navadi med 20—30 GB/dan, predvsem če se SSD uporablja kot sistemski disk. SSD pogoni, ki temeljijo na DRAM pomnilniku, nimajo omejenega števila prepisov. Napake v strojno-programski opremi lahko povzročijo izgubo podatkov.

Trdi diski so zaradi mehanskih komponent podvrženi mehanskim okvaram. Verjetnost izgube podatkov je odvisna od vrste okvare. Načeloma velja, da če se disk ne pokvari v prvih mesecih, ima večjo možnost za daljšo življenjsko dobo.

4.15 VARNOST IN ENKRIPCIJA

NAND bliskoviti pomnilnik ne more biti prepisan. Treba je prej izbrisati blok in ga šele nato prepisati. Če program za enkripcijo kriptira podatek na SSD, so prepisani podatki še vedno nevarovani, nekriptirani in dostopni (strojna enkripcija nima teh težav). Podatki tudi ne morejo biti varno izbrisani s prepisom originalne datoteke, temveč je treba uporabiti posebno proceduro varnega izbrisa, ki je vgrajena v disk. Trdi diski teh omejitev nimajo in lahko prepišejo podatke v katerem koli sektorju.

4.16 KAPACITETA IN CENA NA KAPACITETO

SSD pogoni trenutno dosegajo velikost do 2 TB, najbolj pogosti modeli v prosti prodaji pa so med 64 in 256 GB. Cena GB na SSD pogonu z bliskovitim pomnilnikom je približno 50 centov.

Trdi diski v prosti prodaji danes dosegajo do 4 TB prostora. Cena na GB je pri 3,5-palčnih modelih 4 cente in pri 2,5-palčnih modelih 8 centov.

4.17 SIMETRIJA BRANJA-PISANJA

Trdi diski in cenejši SSD pogoni imajo nižjo hitrost pisanja in višjo hitrost branja. Dražji SSD pogoni imajo hitrosti skoraj izenačene.

4.18 PROSTI BLOKI

Hitrost pisanja na SSD pogonu je zelo odvisna od števila prostih blokov. Uporabljene bloke lahko dobimo nazaj s pomočjo ukaza TRIM. TRIM je ukaz operacijskega sistema, ki sporoči SSD pogonu, kateri bloki podatkov niso več v uporabi in so lahko interno pobrisani. Število prostih blokov ne vpliva na delovanje trdih diskov.

4.19 PORABA ENERGIJE

SSD pogoni z bliskovitim pomnilnikom višjega cenovnega razreda porabijo približno tretjino energije tipičnega trdega diska. SSD pogoni, ki temeljijo na DRAM, porabijo toliko kot navaden trdi disk in morejo biti priključeni na napajanje, tudi ko je preostali sistem izključen. Najmanjši trdi diski (1,8-palčni) lahko porabijo okoli 0,35 V. Tipični 2,5-palčni disk porabi med 2 in 5 V, medtem ko lahko hitri 3,5-palčni diski porabijo tudi do 20 V.

5 PRIMERJAVA DELOVANJA SSD POGONA IN TRDEGA DISKA

Stari magnetni trdi diski in novi polprevodniški SSD pogoni predstavljajo trenutni vrh med računalniškimi pomnilnimi enotami. Uporabniki si postavljajo vprašanje, ali je že napočil čas, da se magnetne diske odvrže in se jih zamenja z novimi SSD pogoni.

Odgovor sem poskusil utemeljiti z različnimi realnimi testi praktične uporabe in s sintetičnimi testi, z uporabo profesionalnega programa za testiranje hitrosti delovanja računalniških komponent. Diske sem primerjal predvsem z vidika navadnih uporabnikov, zato sta testna diska srednjega cenovnega razreda. Posamezni testi simulirajo vsakodnevno uporabo povprečnega uporabnika.

Diska, uporabljena na testu:

Polprevodniški disk OCZ AGILITY 3 SATA III s specifikacijami:

- kapaciteta: 120 GB;
- vmesnik: SATA 3 – 6 GB/s;
- iskalni čas: 0,1 ms;
- povprečna hitrost branja: 287 MB/s;
- povprečna hitrost pisanja 274 MB/s;
- cena na GB: 0,87 EUR/GB.

Trdi disk Hitachi Deskstar 7K3000 s specifikacijami:

- kapaciteta: 2 TB;
- vmesnik: SATA 3 – 6 GB/s;
- hitrost vrtenja plošč: 7200 obratov/minuto;
- predpomnilnik: 64 MB;
- povprečna hitrost branja: 120 MB/s;
- povprečna hitrost pisanja 118 MB/s;
- cena na GB: 0,06 EUR/GB.

Testi so bili opravljeni na računalniku s specifikacijami:

- procesor: Intel Core i5-3750 @ 3,4 GHz;
- RAM: 8,00 GB @ 1333 MHz;
- matična plošča: ASRock Z77 Pro4 z Z77 veznim naborom.

5.1 METODA TESTIRANJA

Pred testiranjem sem na oba diska na novo namestil operacijski sistem Windows 7 Professional 64-bit. Poleg sistema sem namestil še testna programa, tako da je zasedenost pogonov znašala 51 GB. Trdi disk je bil pred začetkom testiranj večkrat defragmentiran, s čimer zmanjšam vpliv razdrobljenosti podatkov na rezultate.

S praktičnimi realnimi testi sem preveril hitrost delovanja računalnika med normalno vsakodnevno uporabo. V ta namen sem preveril hitrost nalaganja operacijskega sistema,

hitrost nalaganja in uporabe programa, hitrost kopiranja večje datoteke in večje količine manjših datotek ter nalaganja igre. Sintetični test je bil opravljen s priljubljenim in prizanim programom za testiranje hitrosti računalniških komponent PCMark 7. Vse meritve praktičnih testov sem ponovil 5-krat. Rezultati tako predstavljajo povprečno vrednost petih meritev.

5.1.1 NALAGANJE SISTEMA

Kot začetno točko za meritev hitrosti nalaganje sistema sem določil izhod iz BIOS-a. Ciljna točka pa je prikaz zaslona za prijavo v sistem. Meritve so bile opravljene s štoparico.

REZULTAT

Čas zagona Windows operacijskega sistema na OCZ AGILITY 3 SATA III: **15,6 sekund.**

Čas zagona Windows operacijskega sistema na Hitachi Deskstar 7K3000: **35,2 sekund.**

Prednost SSD pogona: **55,7 %.**

5.1.2 KOPIRANJE DATOTEK

Preverjanje hitrosti dela z datotekami sem razdelil na dva preizkusa, in sicer kopiranje ene večje datoteke (4 GB velikosti) in kopiranje večjega števila datotek različnih velikosti (44.022 datotek s skupno velikostjo 4 GB). Za pridobitev čim bolj natančnega rezultata sem za kopiranje pripravil posebno skripto za Windows ukazno vrstico. Skripta mi je za poljuben ukaz preverila čas zagona ukaza in čas končanja ukaza ter iz tega izračunala razliko in s tem čas trajanja ukaza.

```
@ECHO OFF
```

```
call :Start
```

```
::
```

```
::Vstavi poljuben ukaz
```

```
::
```

```
call :Stop
```

```
call :PokaziCas
```

```
goto :EOF
```

```
:Start
```

```
:: Shrani zacetni cas
```

```
set StartCAS=%TIME%
```

```
for /f "usebackq tokens=1-4 delims=:," %%f in (`echo %StartCAS: =0%`) do set /a
```

```
Start100S=1%%f*360000+1%%g*6000+1%%h*100+1%%i-36610100
```

```
goto :EOF
```

```
:Stop
```

```
:: Shrani koncni cas
```

```
set StopCAS=%TIME%
```

```

for /f "usebackq tokens=1-4 delims=:., " %%f in (`echo %StopCAS: =0%`) do set /a
Stop100S=1%%f*360000+1%%g*6000+1%%h*100+1%%i-36610100
set /a CASP=%Stop100S%-Start100S%
set CAS=0%CASP%
goto :EOF

:PokaziCas
:: pokazi cas
echo Zacetni: %StartCAS%
echo Koncni: %StopCAS%
echo Trajanje: %CASP:~0,-2%.%CAS:~-2% sekund
goto :EOF

```

Uporabljena ukaza sta:

MKDIR [ime] – ukaz za ustvarjenje mape, v katero bomo kopirali datoteke.
 XCOPY [izvir] [ponor] /E /C /Q – ukaz kopira datoteke iz ene mape v drugo. Zastavica /E zagotovi, da se kopira celotna struktura mape, /C ignorira morebitne napake, /Q skrije izpis kopiranih datotek za večjo preglednost.

REZULTAT

Čas kopiranja velike datoteke na OCZ AGILITY 3 SATA III: **61,41 sekund.**

Čas kopiranja večjega števila datotek na OCZ AGILITY 3 SATA III: **150,07 sekund.**

Čas kopiranja velike datoteke na Hitachi Deskstar 7K3000: **97,42 sekund.**

Čas kopiranja večjega števila datotek na Hitachi Deskstar 7K3000: **317,07 sekund.**

Prednost SSD pogona pri kopiranju večje datoteke: **36,9 %.**

Prednost SSD pogona pri kopiranju večjega števila datotek: **52,6 %.**

5.1.3 DELOVANJE APLIKACIJE

Za preizkus delovanja aplikacij sem se odločil uporabiti Adobov program Photoshop CS4. Photoshop je priljubljen program med amaterskimi in profesionalnimi uporabniki za ustvarjanje in obdelavo slik. V Photoshopu sem testiral hitrost zagona programa od dvojnega klika na ikono do prikaza prazne delovne površine, čas potreben za odpiranje večje slike, čas obračanja slike za 180 stopinj in shranjevanje slike v novo datoteko.

REZULTATI

	SSD OCZ AGILITY 3 SATA III	Trdi disk Hitachi Deskstar 7K3000	Prednost SSD pogona v %
Zagon Photoshopa CS4	6,62	11,47	42,2
Odprtje 116 MB velike slike	1,56	2,38	34,4
Vrtenje slike za 180°	1,31	1,43	8,3
Shranjevanje slike v novo datoteko	1,54	1,82	15,3
Skupno	11,03	17,10	35,5

Tabela 2: Tabela izmerjenih časov

5.1.4 DELOVANJE RAČUNALNIŠKE IGRE

Pri preizkusu delovanja računalniških iger sem se odločil uporabiti igro World of warcraft. World of warcraft je masovna spletna igra z odprtim svetom in velikim številom poligonskih modelov, ki pripomorejo dolgim časom nalaganja. Na hitrost delovanja igre, ki je merjena v sličicah na sekundo, uporaba enega ali drugega diska nima vpliva, zato sem test omejil le na čas nalaganja igri iz prijavnega okna do vstopa v igro. Meritve so bile opravljene s štoparico.

REZULTAT

Čas nalaganja igre na OCZ AGILITY 3 SATA III: **6,3 sekund.**

Čas nalaganja igre na Hitachi Deskstar 7K3000: **17,8 sekund.**

Prednost SSD pogona: 64,6 %.

5.1.5 SINTETIČNI TEST

Sintetične teste izvedemo z uporabo različnih specializiranih programov. Glavna naloga teh programov je skozi različne metode in preizkuse določiti relativno hitrost preizkušene računalniške komponente. Podani rezultat lahko nato uporabimo za primerjavo delovanja različnih drugih komponent. Med bolj poznane programe štejemo PCMark, 3DMark, Sisoft Sandra, HD tune ... Programi so lahko uporabljeni za istočasno testiranje več različnih komponent računalnika, od procesorja do optičnih enot, ali pa so specializirani na posamezne komponente.

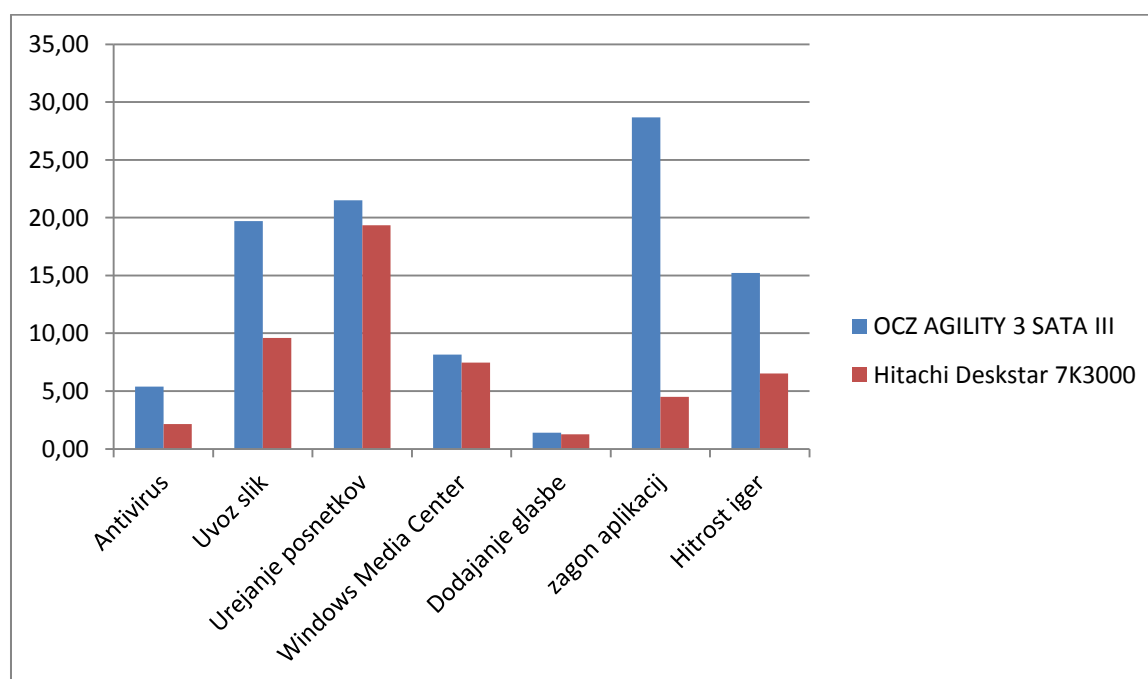
Za preizkus delovanja sem se odločil uporabiti Futuremarkov program PCMark 7. Glavna prednost PCMark 7 je ta, da simulira tipično uporabo računalnika in glede na odzivnost komponent poda oceno posameznih komponent in končno skupno oceno celotnega računalnika. To uporabnikom omogoča lažje primerjanje posameznih komponent in iskanje najbolj primernih nadgradenj. Testi PCMark 7 so razdeljeni na 7 kategorij:

- Lahkotni testi, kjer se preverja delovanje na počasnejših računalnikih, predvsem takih, kjer se istočasno poganja manjše število aplikacij. Test je idealen za testiranje delovanja računalnikov z Windows 7 Starter sistemom.
- Testi zabave, kjer se preverja delovanje pri snemanju in predvajanju posnetkov, organiziranju in predvajanju glasbe ter različne naloge med igranjem video iger.
- Kreativni testi, kjer se preverja delovanje med tipičnimi nalogami urejanja, prekodiranja, shranjevanja posnetkov in slik.
- Testi produktivnosti, kjer se preverja delovanje med nalaganjem spletnih strani in uporabi pisarniških aplikacij.
- Računski testi, kjer se preverja samo hitrost sistema pri izvajanju različnih sistemskih operacij.
- Testiranje pomnilnih enot, ki simulira normalno uporabo različnih aplikacij ter preveri hitrost prenosov le-teh.

Vsaka kategorija poda številčno oceno, ki je nato združena v PCmark kategoriji, ki poda končno oceno sistema. Višja, kot je ocena, hitrejši je sistem.

Za preizkus diskov sem se osredotočil na test pomnilnih enot. Test simulira hitrost prenosa v antivirusnih programih, pri uvozu slik, urejanje posnetkov, v Windows Media Centru, pri dodajanju glasbe, zagonu aplikacij in hitrosti video iger. Rezultati posameznih testov v Grafu 1 so podani v MB/s, višja številka pomeni višji rezultat.

REZULTAT



Graf 1: Dobljeni rezultati v MB/s za posamezno meritev

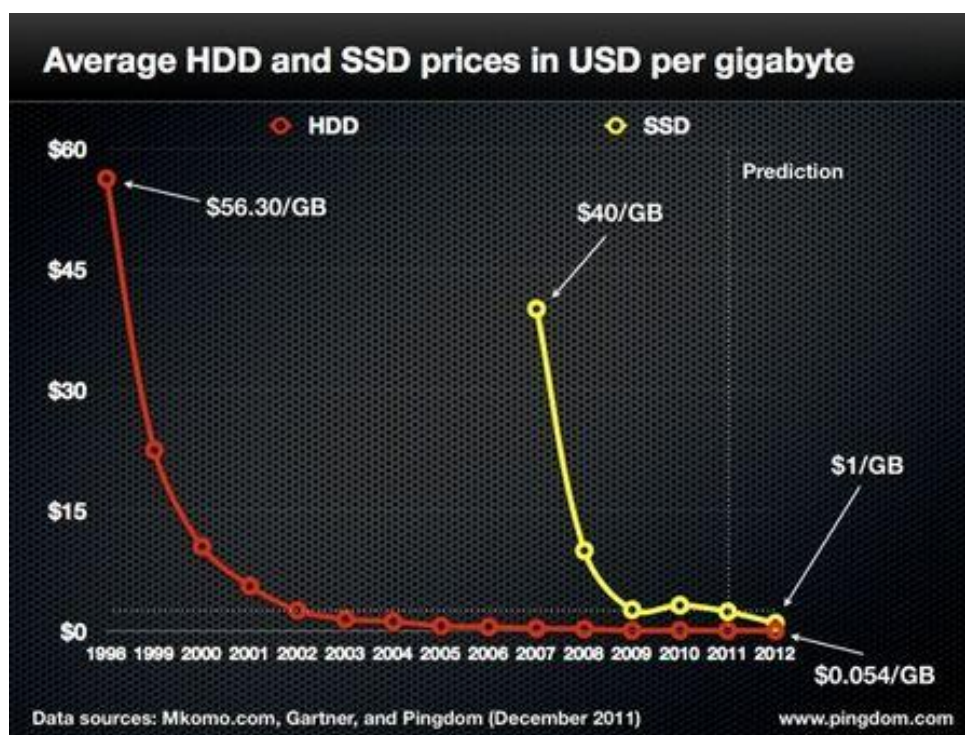
PCMark je dobljene rezultate združil v končno oceno:

OCZ AGILITY 3 SATA III: **4.452 točk.**

Hitachi Deskstar 7K3000: **2.352 točk.**

5.2 CENA

Pri računalniških tehnologijah je tipičen 50 % padec cen vsako leto. Žal to ne velja za SSD pogone, ker obstaja ogromno ključnih patentov pri izdelavi bliskovitega NAND pomnilnika, ki omejujejo konkurenčnost na trgu in s tem zavirajo padec cen. V nasprotju s trdimi diski, kjer tehnologija ovira rast kapacitete, je pri potrošniških SSD pogonih rast kapacitete pogojena s ceno. To je tudi eden glavnih razlogov, da so po treh letih še vedno najbolj pogoste kapacitete 64, 128 in 256 GB. Kljub temu cena na GB SSD pogona pada hitreje kot cena trdih diskov (Graf 2).



Graf 2: Cena GB skozi leta (Povzeto po [29])

Bližanju cen obeh izdelkov je nepričakovano v letu 2011 pomagala narava sama. Poplave na Tajskem so povzročile veliko škode v tamkajšnjih tovarnah, ki so glavne izdelovalke ključnih komponent magnetnih diskov na svetu. Slednje je povzročilo veliko pomanjkanje trdih diskov na tržišču in dvig cen tudi za 50 %. Analitiki pričakujejo, da se bodo cene trdih diskov normalizirale šele leta 2014. Po drugi strani je pomanjkanje trdih diskov dvignilo povpraševanje po SSD in s tem pospešilo padec cen. Kljub temu ni pričakovati, da se bodo v bližnji prihodnosti cene trdih diskov in SSD pogonov izenačile, vsaj dokler ne bo dosežena fizična meja zapisovanja na magnetni disk.

6 ZAKLJUČEK

Tehnologija trdih diskov je prehodila dolgo pot, iz začetnih naprav v velikosti hladilnika, do današnjih naprav, ki omogočajo shranjevanje vseh podatkov večje knjižnice v dlani ene roke. Ta pot se danes še vedno nadaljuje v smeri višjih gostot zapisa, hitrejšega vrtenja in zanesljivejše mehanike, ki nam bo prinesla večje, hitrejša in zanesljivejše diske. Kljub temu bo trde diske na koncu omejila fizična meja magnetnega medija, če jih ne bodo prej v vseh pogledih prekosili SSD pogoni.

Uporabniki danes iščejo predvsem hitrost, visoke kapacitete, zanesljivost in nizko porabo energije. SSD pogoni trenutno, razen kapacitete, ponujajo vse naštetu. Po opravljenih testih so SSD pogoni tudi do 50 % hitrejši pri vsakodnevnih opravilih in blestijo predvsem pri dostopu do naključnih podatkov. Zaradi manjka uporabe mehanskih delov so SSD pogoni veliko bolj zanesljivi in odporni na zunanje vplive kot trdi diski. Do več kot polovica manjša poraba energije naredi SSD pogone idealne za vgradnjo v prenosne naprave. Kljub temu SSD pogoni niso brez hib. Glavni težavi SSD pogonov sta obraba celic, ki sicer navadnega uporabnika ne bi smela prizadeti, in visoka cena v primerjavi s trdimi diski.

Ali je že nastopil čas, da se znebimo trdih diskov? Odgovor je trenutno še vedno ne. Trdi disk zaradi visoke kapacitete še vedno ostaja odlična naprava za shranjevanje večje količine podatkov, kot so slike, posnetki in redko uporabljene aplikacije. SSD pa je po drugi strani idealna naprava za sistemski disk, kjer so poleg sistema nameščene še redno uporabljene aplikacije.

Glede na vse navedeno, ugotavljam, da se investicija v SSD pogon izplača. Investicija v SSD pogon bo, kljub relativno visoki ceni, pospešila delovanje celotnega računalniškega sistema, več kot nadgradnja katere koli druge komponente iz iste generacije.

7 LITERATURA

- [1] Virtual Exhibitions in Informatics. Dostopno na: <http://cs-exhibitions.uni-klu.ac.at/index.php?id=187>
- [2] MaximumPC, Computer Data Storage Through the Ages – From Punch Cards to Blu-Ray. Dostopno na: http://www.maximumpc.com/article/news/computer_data_storage_through_ages
- [3] Royal Pingdom, The history of computer data storage, in pictures. Dostopno na: <http://royal.pingdom.com/2008/04/08/the-history-of-computer-data-storage-in-pictures/>
- [4] Wikipedia, Punched card. Dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Punch_card
- [5] Wikipedia, Punched tape. Dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Punched_tape
- [6] Wikipedia, Magnetic tape data storage. Dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_tape_data_storage
- [7] Wikipedia, Floppy disk. Dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Floppy_disk
- [8] Wikipedia, CD-ROM. Dostopno na: <http://en.wikipedia.org/wiki/CD-ROM>
- [9] Wikipedia, Memristor. Dostopno na: <http://en.wikipedia.org/wiki/Memristor>
- [10] Blaž Kavčič, Holografsko shranjevanje podatkov. Dostopno na: http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2007_2008/kavcic_seminar2.pdf
- [11] Carbon nanoballs as data storage units. Dostopno na: <http://phys.org/news171041009.html>
- [12] Hard disk basics. Dostopno na: <http://www.scribd.com/doc/37792234/Hard-Disk-Basics>
- [13] Wikipedia, Hard disk drive. Dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Hard_disk_drive
- [14] MaFiRa-Wiki, Trdi diski. Dostopno na: http://wiki.fmf.uni-lj.si/wiki/Trdi_disk
- [15] Igor Škraba, Vhodno izhodne naprave – magnetni disk (povzetek predavanj)
- [16] Wikipedia, Disk read-and-write head. Dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Disk_read-and-write_head

- [17] PCGuide, Head Load/Unload Technology. Dostopno na:
<http://www.pcguides.com/ref/hdd/perf/qual/featuresHead-c.html>
- [18] Wikipedia, Advanced Format na: http://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Format
- [19] Wikipedia, Hard-disk failure. Dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Hard-disk_failure
- [20] Wikipedia, Multi-level cell. Dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Multi-level_cell
- [21] Wikipedia, Flash memory. Dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Flash_memory
- [22] Wikipedia, Floating-gate MOSFET. Dostopno na:
http://en.wikipedia.org/wiki/Floating-gate_transistor
- [23] Wikipedia, Memory card, in pictures. Dostopno na:
http://en.wikipedia.org/wiki/Memory_card
- [24] Wikipedia, USB flash drive. Dostopno na:
http://en.wikipedia.org/wiki/USB_flash_drive
- [25] Anandtech, The SSD Anthology: Understanding SSDs and New Drives from OCZ. Dostopno na: <http://www.anandtech.com/print/2738>
- [26] Wikipedia, Solid-state drive. Dostopno na: <http://en.wikipedia.org/wiki/Ssd>
- [27] Joker, Hitrostna revolucija shrambe. Dostopno na:
<http://www.joker.si/article.php?rubrika=2&articleid=8741>
- [28] Pcmark, PCMark 7. Dostopno na: <http://www.pcmark.com/benchmarks/index.html>
- [29] Tomshardware, SSD Prices Falling Faster Than HDD Prices. Dostopno na:
<http://www.tomshardware.com/news/ssd-hdd-solid-state-drive-hard-disk-drive-prices,14336.html>
- [30] Guardian, SSD prices have halved in a year: is it time to get one now?. Dostopno na:
<http://www.guardian.co.uk/technology/blog/2012/jun/22/ssd-prices-fall>
- [31] Igor Škraba, Vhodno izhodne naprave – optični disk (povzetek predavanj)
- [32] Notebookcheck, SSDs and HDDs in comparison. Dostopno na:
<http://www.notebookcheck.net/SSD-versus-HDD-in-comparison.18750.0.html>
- [33] Dušan Kodek, Arhitektura in organizacija računalniških sistemov, Bi-tim, 2000, ISBN 961-6046-09-8, pogl. 1,2,3,8,9 in 10.